

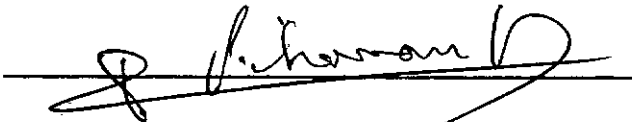

ADENSAMENTO RADIAL DE ARGILAS:
PROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA E ESTUDO EXPERIMENTAL

DELISLE LOPES DA SILVA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE "MESTRE EM CIÊNCIA" (M.Sc.).

Aprovada por:


Presidente

RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL
DEZEMBRO DE 1971

A minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. JACQUES DE MEDINA pelos ensinamentos e orientação dispensados na realização de tôdas as tarefas dêste trabalho.

Ao Prof. FERNANDO LUIZ LÔBO L. CARNEIRO pelo apôio concedido.

Ao Prof. YOSIAKI NAGATO pela colaboração prestada.

Ao Reitor e Vice-Reitor da Universidade Federal do Pará, Professôres ALUÍSIO CHAVES e ANGENOR PENNA DE CARVALHO, pelas facilidades proporcionadas.

Aos componentes do Núcleo de Computação Eletrônica da UFRJ pela colaboração.

À D. WANDA F. ROCHA pela confecção gráfica dêste trabalho.

SUMÁRIO

A teoria do adensamento dos solos é revista, dando-se destaque aos trabalhos sôbre Adensamento Radial. Refere-se nesta 1a. parte às contribuições originais de engenheiros brasileiros.

Na 2a. parte, justifica-se e desenvolve-se a programação automática em linguagem FORTRAN para cálculo das curvas de Porcentagem de Adensamento Radial (u_h) "versus" Fator Tempo (T_h), para qualquer relação de diâmetros (círculo de influência ÷ dreno). Estabeleceu-se um programa principal abordando duas soluções da equação de Adensamento Radial, e dois subprogramas, sendo um para cálculo das raízes da equação de condição envolvendo funções de Bessel (Subrotina Zeros) e outra para cálculo dos coeficientes p e q da equação

$$\frac{\bar{u}_h}{u_0} = \sum_{i=1}^{i=\infty} p_i e^{q_i T_h} \quad (\text{Subrotina Coef}),$$

onde o 2º membro é uma série convergente. Analisa-se a influência da precisão adotada no cálculo das raízes e influên

cia do número destas. Apresentam-se os diagramas de blocos e as listagens do programa. Em Apêndice estão exemplos de aplicação do programa para diferentes relações n de diâmetros, e a indicação de como estender o programa a fim de atender à determinação da poro-pressão (e grau de adensamento) em qualquer ponto e instante.

A 3a. parte do trabalho descreve a verificação experimental, a título ilustrativo, da aplicação do programa de computação a ensaios de adensamento radial centrípeto (dreno central de areia com mica), realizados pelo Autor no Laboratório de Mecânica dos Solos da COPPE-UFRJ. Este ensaio visa à determinação do coeficiente de permeabilidade horizontal do solo argiloso, dado este essencial do projeto de drenos verticais de areia, executados para acelerar o adensamento de solos argilosos.

ABSTRACT

First a review of consolidation theory of soils specially radial drainage consolidation, pointing out original works by Brazilian Engineers.

The second part deals with the automatic programming in FORTRAN language to calculate degree of radial consolidation (u_r) against Time Factor (T_h), for any diameter ratio (circle of influence/drain well). One main program was developed to determine two solutions of the equation for radial consolidation. Two subprograms were also developed, one to determine the roots of the condition equation involving Bessel functions (subroutine Zeros) and the other to determine the coefficients p and q from equation

$$\frac{\bar{u}_r}{u_0} = \sum_{i=1}^{i=\infty} p_i e^{q_i T_h} \quad (\text{subroutine Coef}),$$

where the second member is a convergent series. The adopted precision is analyzed regarding the calculation and the number of roots. Block diagrams and listing are presented. The appendix contains examples of application of developed program

for different diameter ratios n . Also shown how to extend the program in order to determine pore-water pressure (and degree of consolidation) for any point and time.

The third part describes the experimental study performed at the Soil Mechanics Laboratory of COPPE-UFRJ by the Author. It was intended only to illustrate the application of the computer program to tests of radial consolidation (centripetal drainage towards a vertical drain of sand and mica). This test aims at the determination of the coefficient of horizontal permeability of clayey soils, which is important for designing sand vertical drains to accelerate consolidation of such soils.

Í N D I C E

Capítulos:

Páginas:

I REVISÃO DA TEORIA

1.	0 ADENSAMENTO DOS SOLOS	1
1.1	Generalidades	1
1.2	Equação Diferencial do Adensamen to	3
2.	ADENSAMENTO UNI-DIMENSIONAL	11
2.1	Estimativa do Recalque Total	11
2.2	Evolução do Adensamento	16
3.	ADENSAMENTO RADIAL - DRENOS DE AREIA .	22
3.1	Análise de Barron	22
3.2	Simplificação da Análise	23
3.3	Consolidação por Escoamento Ra- dial	25
3.4	Efeito do "Smear"	35
3.5	Efeito da Resistência do Dreno ao Escoamento	42
3.6	Drenagem Radial Externa - Análise do Professor Icarahi da Silveira.	45

II PROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA

1.	INTRODUÇÃO	49
----	------------------	----

Capítulos:	Páginas:
2. DETALHES DA PROGRAMAÇÃO	50
3. APRESENTAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA	53
4. CARTÕES DE DADOS E RESULTADOS	58
5. CONSIDERAÇÕES DE MEMÓRIA E TEMPO DE EXECUÇÃO	59
6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES	63
7. DIAGRAMA DE BLOCOS E LISTAGEM DO PRO GRAMA	71
APÊNDICE II-1	
APÊNDICE II-2	
III <u>ESTUDO EXPERIMENTAL</u>	
1. INTRODUÇÃO	118
2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	118
3. RESULTADOS	121
4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	133
5. ILUSTRAÇÃO FOTOGRÁFICA	135
BIBLIOGRAFIA	137

CAPÍTULO I

REVISÃO DA TEORIA

1. O ADENSAMENTO DOS SOLOS

1.1 - Generalidades: O Processo do Adensamento, Pressões Neutras e Efetivas, Grau de Adensamento, Recalques.

A compressão do solo resulta principalmente do decrêscimo de volume de vazios, sendo praticamente desprezível o decrêscimo decorrente da diminuição de volume das partículas sólidas. Portanto, se o solo é saturado, a compressão ocorre sômente como resultado do escape da água dos vazios. A compressão gradual de um solo sob tais condições, provocada por cargas como o pêsso próprio do solo, ou de estruturas erigidas, é chamada de Adensamento, sendo também, muito frequente o têrmo Consolidação.

Para solos de baixa permeabilidade, o escape da água dos vazios é lento e, inicialmente, antes que qualquer redução dos vazios tenha ocorrido, as novas tensões de compressão aplicadas ao solo são contidas totalmente pela água. Se a drenagem é permitida, os gradientes hidráulicos resul

tantes induzem o escoamento da água, iniciando-se a fase de compressão lenta. Com o escape da água dos vazios, as pressões aplicadas vão sendo transferidas para as partículas sólidas, aumentando portanto as pressões intergranulares e causando conseqüentemente uma redução do excesso de poro-pressão.

Qualquer decréscimo no valor da pressão neutra deve corresponder a um igual acréscimo no valor da pressão efetiva, de modo que a soma das duas, a qualquer instante, deve permanecer constante e igual à pressão aplicada, ou seja:

$$u + \sigma = p_0 .$$

Após toda a pressão p_0 ser transferida para as partículas sólidas, tal que $p_0 = \sigma$, o excesso de poro-pressão u torna-se igual a zero em todos os pontos, cessando então a drenagem. O adensamento é dito ter alcançado seu final.

Estágios intermediários do processo de adensamento podem ser definidos pela porcentagem ou grau de adensamento.

$$u_z = \frac{u_0 - u}{u_0} \times 100 = \left(1 - \frac{u}{u_0} \right) \times 100$$

onde u_0 é o excesso de poro-pressão inicial, e u é a poro-pressão no estágio considerado.

A porcentagem de adensamento é nula por ocasião da aplicação do carregamento ($u=u_0$), e igual a 100% no final do processo de adensamento, quando $u = 0$.

As deformações ou recalques que ocorrem no solo, sob a ação de cargas, são particularmente importantes em se tratando de solos argilosos, porque eles evoluem muito lentamente, em face do baixo coeficiente de permeabilidade das argilas. Na prática, interessa o conhecimento do recalque total, bem como sua evolução com o tempo.

1.2 - Equação Diferencial do Adensamento

O estabelecimento de uma equação geral para reger o processo do adensamento é feito considerando o escoamento da água segundo um processo tridimensional e mediante algumas hipóteses:

1a.) o solo é saturado;

2a.) as partículas sólidas e a água são incompressíveis.

A variação de volume por unidade de tempo, de um elemento de solo de lados dx , dy , dz , é expressa pela equação:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = dx \cdot dy \cdot dz \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)$$

onde v_x , v_y , v_z são as componentes da velocidade de escoamento da água no ponto considerado.

Sendo:

V_s = volume de sólidos do elemento de volume.

e = índice de vazios.

Teremos:

$$V = V_s(1+e) = dx \, dy \, dz \quad \therefore \quad \frac{\partial V}{\partial t} = V_s \frac{\partial e}{\partial t}$$

$$v_s = \frac{dx \, dy \, dz}{1 + e} = \text{constante}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{dx \, dy \, dz}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

Então:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = (1+e) \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)$$

A variação da carga total h , é devida somente à variação do excesso de pressão hidrostática u . Então, as perdas de carga ao longo das dimensões do elemento de volume serão:

$$\partial h_x = \frac{1}{\gamma_w} \partial u \quad (\text{ao longo de } dx)$$

$$\partial h_y = \frac{1}{\gamma_w} \partial u \quad (\text{ao longo de } dy)$$

$$\partial h_z = \frac{1}{\gamma_w} \partial u \quad (\text{ao longo de } dz)$$

3a.) A lei de Darcy é válida e pode ser generalizada aos meios anisotrópicos.

$$v_x = k_x \cdot i_x \quad v_y = k_y \cdot i_y \quad v_z = k_z \cdot i_z$$

o gradiente hidráulico i , ou perda de carga sobre uma dada distância \bar{e} :

$$i_x = \frac{\partial h_x}{\partial x} \quad i_y = \frac{\partial h_y}{\partial y} \quad i_z = \frac{\partial h_z}{\partial z}$$

d'onde:

$$v_x = \frac{k_x}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad , \quad v_y = \frac{k_y}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \quad , \quad v_z = \frac{k_z}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$$

4a.) O solo é homogêneo, isto resulta em que k_x , k_y , k_z são independentes das coordenadas x , y , z do ponto considerado.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{k_x}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad ; \quad \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{k_y}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad ; \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{k_z}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Logo:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{1 + e}{\gamma_w} \left(k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

Em qualquer instante devemos ter:

$$u + \sigma = p_f$$

u = excesso de poro-pressão.

σ = pressão intergranular.

p_f = pressão intergranular no final do adensamento.

A fim de que essa relação se mantenha constante, qualquer acréscimo em σ deve igualar-se a um decréscimo em u .

então:

$$\partial \sigma = - \partial u$$

Define-se o coeficiente de compressibilidade do solo como sendo:

$$a_v = - \frac{\partial e}{\partial \sigma}$$

O sinal menos indica que e decresce enquanto σ cresce. Pode-se concluir então que: $\partial e = a_v \partial u$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1+e}{a_v \gamma_w} \left(k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

fazendo:

$$c_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w}$$

c_v é o coeficiente de adensamento.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + c_{vy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Para problemas que apresentam simetria radial, tais como os de drenos de areia, torna-se conveniente a μ

dança de coordenadas retangulares para cilíndricas.

$$x = r \cos \theta$$

$$y = r \sin \theta$$

$$z = z$$

Se no plano XY , c_v é suposto constante, então:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vr} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

c_{vr} é o coeficiente de adensamento por escoamento radial.

c_{vz} é o coeficiente de adensamento por escoamento vertical.

O adensamento pode ser considerado então como consistindo de duas partes:

1) adensamento por escoamento vertical;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

2) adensamento por escoamento radial;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vh} \left(\frac{1}{h} \frac{\partial u}{\partial h} + \frac{\partial^2 u}{\partial h^2} \right).$$

A solução da primeira equação foi obtida por Terzaghi e Frölich ("Theorie der Setzung von Tonschichten") e a solução da segunda foi obtida por Rendulic ("Der Hydrodynamische Spannungsgleich in Zentral Entwässerten Touzylin dern").

Assinalamos aqui, a contribuição pioneira de um engenheiro brasileiro, o Dr. ALBERTO ORTENBLAD ⁷, que substanciou os estudos de Terzaghi, com sua tese de doutoramento intitulada, "Mathematical Theory of The Process of Consolidation of Mud Deposits" apresentada no Instituto de Tecnologia de Massachussetts em 1926.

Outro especialista brasileiro que trouxe contribuições originais à Teoria do Adensamento foi o Dr. Icarahi da Silveira¹¹, no que toca ao adensamento com drenagem radial.

Como meio de simplificação, serão admitidas as expressões Adensamento Radial e Adensamento Longitudinal ou Uni-dimensional nos lugares das expressões Adensamento por

Escoamento Radial e Adensamento por Escoamento Vertical, respectivamente.

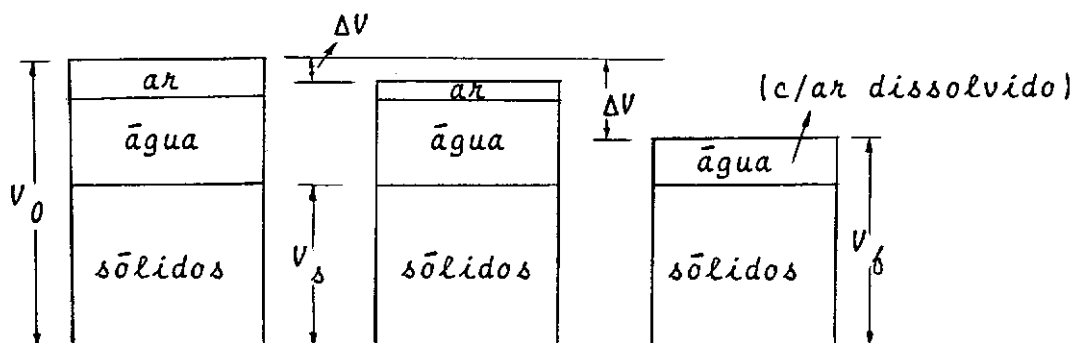
2 - Adensamento Uni-dimensional

O estudo do adensamento uni-dimensional compreende duas fases:

- 2-1) avaliação do recalque total, sem limitação de tempo;
- 2-2) determinação da velocidade de adensamento, isto é a porcentagem do recalque total obtida após determinado tempo.

2.1 - Estimativa do Recalque Total

Os recalques são estimados considerando a variação uni-dimensional de volume.



No caso mais geral de solo não saturado, ao ser este comprimido, há expulsão do ar dos poros e, em parte, dissolução do mesmo na água. No adensamento classicamente tratado - o de solos sedimentares saturados (ou quase) - trata-se o solo como sistema bifásico.

Sejam:

e_0 = índice de vazios inicial do solo.

e_f índice de vazios final, após compressão.

Supondo-se a proporcionalidade $\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta H}{H_0}$, pode-se concluir facilmente que:

$$\Delta H = H_0 \times \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

sendo $\Delta e = e_0 - e_f$.

A relação entre Δe e a variação da pressão efetiva $\Delta \sigma$, é determinada experimentalmente através de testes de compressão uni-dimensional. A inclinação da curva índice de vazios "versus" pressão efetiva, é chamada de coeficiente de compressibilidade.

Portanto: $a_v = - de/d\sigma$.

O valor de a_v decresce quando σ cresce; contudo, para pequenos incrementos de pressões, a_v pode ser considerado constante, sendo válida então a expressão:

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma} \quad \therefore \quad \Delta e = - a_v \Delta \sigma$$

ignorando o sinal menos de a_v , teremos:

$$\Delta H = H_0 \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta \sigma \quad \text{ou} \quad \Delta H = H_0 m_v \Delta \sigma$$

onde

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0}$$

é chamado de *coeficiente de compressibilidade volumétrica*. m_v representa a compressão da argila por unidade de volume original e por unidade de pressão.

Se $\Delta \sigma$ é suficientemente grande, tal que o valor de a_v não possa ser considerado constante, então:

$$dH_i = H_i \frac{a_v}{1 + e_0} d\sigma = H_i m_v d\sigma$$

e, portanto

$$\Delta H = \int_i dH_i = \int_i H_i m_v d\sigma$$

A integração desta equação pode ser executada gr̃aficamente pela subdivis̃o do estrato em camadas convenientes, tal que em cada camada o produto $m_v \Delta\sigma$ seja aproximadamente constante, sendo ent̃o ṽalida a express̃o:

$$\Delta H = \sum_i H_i (m_v \Delta\sigma)_i$$

onde o subscripto i refere-se a cada camada na subdivis̃o.

Ainda com respeito à relac̃o entre Δe e $\Delta\sigma$, ē muito mais frequente o traçado da curva índice de vazios, "versus" logar̃itmo da press̃o efetiva. A inclinac̃o desta curva ē dada por:

$$c_c = - \frac{de}{d(\log \sigma)} .$$

c_c é o índice de compressão.

Ao contrário de a_v e m_v , que decrescem rapidamente com o aumento de pressão, o valor de c_c permanece constante mesmo para grandes variações no valor da pressão.

Para um dado valor de $\Delta\sigma$, as relações entre os valores de a_v , m_v e c_c são facilmente deduzidas.

$$c_c = - \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma)} \quad - \Delta e = c_c \Delta(\log \sigma) = c_c \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

$$a_v \Delta\sigma = c_c \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \quad \therefore \quad a_v = \frac{c_c}{\Delta\sigma} \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

$$m_v = \frac{c_c}{\Delta\sigma(1+e_0)} \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

o valor do recalque total em função do índice de compressão será:

$$\Delta H = H_0 m_v \Delta\sigma \quad \therefore \quad \Delta H = H_0 \frac{c_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

No caso de distribuição variável de pressões ao longo da profundidade, o recalque total será computado através de uma subdivisão do estrato em camadas intermediárias, em cada qual existindo uma pressão média reinante.

Logo:

$$\Delta H = \sum_i H_i \left(\frac{c_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \right)_i .$$

2.2 - Evolução do Adensamento - Terzaghi

O progresso dos recalques de uma camada de argila, é frequentemente calculado com base na Teoria de Terzaghi sobre o adensamento. Sua principal hipótese simplificada é que o escoamento da água dos vazios se verifica segundo uma única direção. Tal processo de consolidação é governado pela equação:

$$c_{vz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} .$$

A solução desta equação requer o conhecimento da posição das superfícies drenantes e da distribuição de pressões na camada.

Para o caso de uma camada de argila repousando sobre substrato impermeável, e drenada livremente em sua face superior, as condições de fronteira são:

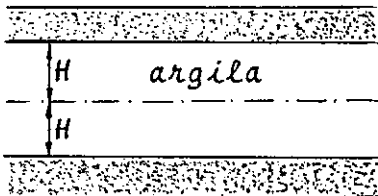


$$u=0 \text{ para } z=0 \quad (\text{drenagem livre})$$

$$t > 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \text{ para } z=H \quad (\text{ausência de drenagem})$$

No caso de existência de drenagem nas duas faces da camada, admite-se que haja uma drenagem simultânea das duas metades superior e inferior da argila, uma para baixo e outra para cima, e toma-se H como sendo a metade da espessura total da camada. Esse artifício permite um cálculo semelhante para os dois casos.



$$u=0 \text{ para } z=0 \text{ e } z=2H$$

$$t > 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \text{ para } z=H$$

Para as condições de fronteira acima, e para a condição inicial $t=0$, $u_i = f(z)$ (onde u_i é o excesso de po-ro-pressão inicial), a solução geral da equação de adensamento unidimensional é:

$$u_z = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{(2n+1)\pi z}{2H} dz \right) \left(\sin \frac{(2n+1)\pi z}{2H} \right) \times$$

$$\times e^{-\frac{c_v t (2n+1)^2 \pi^2}{4H^2}}.$$

Soluções para vários casos de distribuição de u_i com a profundidade, foram obtidas por Terzaghi e Frölich (1936). Por exemplo, se $u_i = u_0 = \text{constante}$ ou, varia linearmente com a profundidade.

$$u_z = u_0 \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-M^2 T_v}$$

onde

$$M = \frac{(2n+1)\pi}{2} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

T_v é o fator tempo para o adensamento unidimensional.

O valor médio da sobrepressão hidrostática a qual
quer instante será dado por:

$$\bar{u}_z = \frac{1}{2H} \int_0^{2H} u_z dz \quad \text{ou} \quad \bar{u}_z = \frac{1}{H} \int_0^H u_z dz$$

cuja solução é:

$$\bar{u}_z = u_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$$

Para avaliar o progresso do adensamento em um ponto
qualquer da camada, e para relacionar a variação do excesso
de pressão hidrostática u com o andamento do recalque,
define-se a porcentagem ou grau de adensamento em um ponto.

$$u_z = \frac{\text{variação de volume na profundidade } z \text{ e instante } t}{\text{variação total de volume à profundidade } z} = \frac{\Delta V_t}{\Delta V_f}$$

a variação de volume iguala-se à variação de volume dos vazios, portanto:

$$u_z = \frac{\Delta V_t}{\Delta V_f} = \frac{\Delta V_{vt}}{\Delta V_{vf}} = \frac{V_s \Delta e_t}{V_s \Delta e_f} = \frac{e_0 - e_t}{e_0 - e_f}$$

Se o coeficiente de compressibilidade a_v é considerado constante durante o adensamento, então:

$$a_v = - \frac{e_0 - e_t}{\sigma_0 - \sigma_t} = - \frac{e_0 - e_f}{\sigma_0 - (\sigma_0 + \Delta\sigma)} \quad \text{com } \sigma_0 + \Delta\sigma = \sigma_f$$

$$\therefore \frac{e_0 - e_t}{e_0 - e_f} = u_z = \frac{\sigma_t - \sigma_0}{\Delta\sigma}$$

Supondo que o excesso de poro-pressão inicial u_0 iguala-se ao incremento de pressão aplicado e, se u é o excesso de poro-pressão quando a pressão efetiva é σ_t , então:

$$\sigma_t = \sigma_f - u = (\sigma_0 + \Delta\sigma) - u = (\sigma_0 + u_0) - u$$

logo:

$$\sigma_t - \sigma_0 = u_0 - u$$

e, portanto:

$$u_z = \frac{u_0 - u}{u_0} = 1 - \frac{u}{u_0}$$

Na prática é interessante o conhecimento da porcentagem de adensamento média para t \tilde{o} da a camada.

$$\bar{u} = \frac{1}{2H} \int_0^{2H} u_z \, dz = \frac{1}{2H} \int_0^{2H} \frac{u_0 - u}{u_0} \, dz$$

substituindo nesta equação o valor encontrado para u , virá:

$$\bar{u}\% = \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 \tau_v} \right] \times 100$$

Encontrou-se que esta equação pode ser representada sem grande êrro pelas seguintes expressões empíricas:

$$\tau_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{u}\%}{100} \right)^2 \quad \text{para} \quad \bar{u}\% < 53\%$$

$$\tau_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - \bar{u}\%) \quad \text{para} \quad \bar{u}\% > 53\%$$

Soluções da equação do adensamento uni-dimensional são apresentadas em vários textos sob a forma de curvas ou tabelas. Leonards⁵ apresenta tabelas para alguns ca

sos de distribuição do excesso de poro-pressão inicial e, através de um exame dos resultados, observa que a distribuição do excesso de poro-pressão inicial, não tem grande efeito na relação entre o Fator Tempo e a Porcentagem de Adensamento. Cita também que considerando a variedade de suposições feitas na teoria, a solução para $u_i = \text{constante}$ é muitas vezes usada na prática.

3. ADENSAMENTO RADIAL - DRENOS DE AREIA

Os drenos verticais de areia são utilizados com a finalidade de acelerar a velocidade de adensamento de solos compressíveis sujeitos a novas cargas, assegurando-se desse modo uma evolução mais rápida dos recalques.

3.1 - Análise de Barron

Importantes estudos teóricos sobre o assunto foram realizados por Reginald Barron¹ com base na Teoria de Terzaghi sobre o adensamento. Considerou ele, que a consolidação se verifica por uma combinação de escoamentos radial e vertical para os drenos, e tratou o problema, analiticamente, considerando os escoamentos horizontal e vertical, em separado. Os valores da sôbrepressão hidrostática com o decorrer do processo de adensamento através dos dois tipos de drenagem podem ser multiplicados para determinação

do seu efeito combinado. O adensamento vertical é analisado através da teoria de Terzaghi, enquanto que o radial é avaliado usando-se a análise de Barron¹.

Incluiu também em sua análise condições em que a permeabilidade do solo próximo às paredes do dreno é reduzida em face do "smear" ou amolgamento que ocorre durante a instalação do dreno, e, incluiu também o efeito da resistência ao escoamento através do dreno, já que os seus primeiros estudos se limitaram a drenos com permeabilidade infinita e sem consideração do efeito do "smear". Barron cita também que como os solos não são homogêneos e em virtude das muitas simplificações feitas, suas soluções devem ser olhadas como aproximadas quando aplicadas a problemas práticos.

3.2 - Simplificação da Análise

Barron¹ considera que o adensamento se desenvolve como resultado da combinação dos escoamentos vertical e horizontal, em direção aos drenos. Segundo N. Carrillo³, a equação que satisfaz o excesso de poro-pressão resultante é dada por:

$$\frac{u_{h,z}}{u_0} = \frac{u_h}{u_0} \times \frac{u_z}{u_0} \quad \text{ou} \quad u_{h,z} = \frac{u_h \times u_z}{u_0}$$

u_h = excesso de poro-pressão no adensamento radial.

u_z = excesso de poro-pressão no adensamento vertical.

$u_{h,z}$ = excesso de poro-pressão resultante.

u_0 = excesso de poro-pressão inicial.

O excesso de poro-pressão média é calculado de maneira análoga.

$$\bar{u}_{h,z} = \frac{\bar{u}_h \times \bar{u}_z}{u_0}$$

onde \bar{u}_h e \bar{u}_z são as sobrepressões hidrostáticas médias para o adensamento radial e vertical, respectivamente.

Barron foi quem dedicou-se mais profundamente ao estudo do adensamento radial, levando em conta sua aplicação no estudo de drenos de areia, sendo conseqüentemente, o autor que desenvolveu uma maior variedade de soluções do problema, abordando vários casos interessantes. Contudo,

as primeiras soluções conhecidas são de autoria de Rendulic (obra mencionada anteriormente), em 1935, estudando a drenagem de uma amostra cilíndrica com um dreno em seu interior. Glover, em 1930 (Technical Memorandum Nº 158, Bureau of Reclamation) também já apresentara soluções similares, ao estudar a difusão do calor em placas, fenômeno regido por uma equação análoga a do adensamento radial. O professor Silveira¹¹ também desenvolveu uma solução, considerando o caso de drenagem radial para o exterior de uma amostra cilíndrica de argila.

Soluções numéricas de problemas tanto de consolidação uni-dimensional como radial, foram desenvolvidas por Gibson e Lumb⁴, e também por Richart⁹.

3.3 - Consolidação Por Escoamento Radial

Um estudo detalhado sobre o efeito dos drenos de areia na distribuição da sôbrepressão hidrostática durante o processo de adensamento, foi realizado por Barron. Ele considerou dois tipos de deformações verticais que podem ocorrer em uma camada de argila:

a) Caso de deformações verticais livres "Free Strain", re

sultando de uma distribuição sempre uniforme da sôbre carga superficial.

- b) Caso de deformações verticais iguais, resultando da imposição de uma mesma deformação vertical em todos os pontos da superfície.

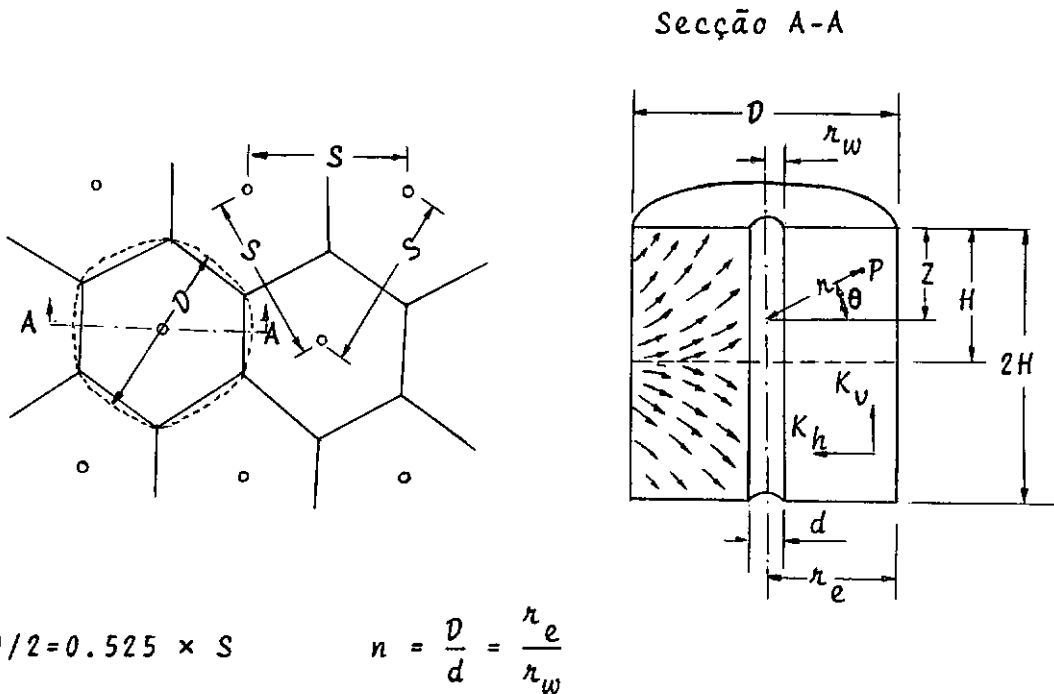
Para ambos os casos êle incluiu também o efeito do "smear" ou amolgamento do solo próximo ao dreno, e ainda o efeito da resistência ao escoamento oferecida pelo dreno. Esses dois efeitos tendem a retardar consideravelmente o tempo de adensamento.

DRENOS IDEAIS

Drenos ideais são aquêles que para efeito de projeto são ignoradas as influências do "smear" e da resistência do dreno ao escoamento. Os drenos ideais foram objeto do primeiro trabalho de Barron em 1944.

A figura mostra um modelo de drenos de areia, o qual permite o escoamento radial e vertical da água dos vazios da camada de argila quando sujeita a um acrêscimo de pressão. Os efeitos devido aos dois tipos de escoamentos

são avaliados separadamente; somente o escoamento radial será considerado aqui.



Para uma distribuição triangular dos drenos, existe uma zona de influência hexagonal para cada dreno, a qual pode ser aproximada a um círculo de diâmetro equivalente D . Então, é suficiente considerar-se o adensamento do volume de solo compreendido entre as distâncias D (diâmetro da zona de influência) e d (diâmetro do dreno).

a) Caso de Deformações Livres ("Free Strain")

Eliminando a consideração do adensamento vertical,

a equação de adensamento torna-se:

$$c_v r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}$$

que é a expressão do adensamento radial em termos de coordenadas cilíndricas.

Considera-se que:

- 1) A distribuição de carga é uniforme sobre a zona circular de influência de cada dreno.
- 2) Os recalques diferenciais que ocorrem sobre cada zona com o progresso do adensamento, não modificam a distribuição de pressões no solo.

As condições de fronteira que devem ser satisfeitas são:

- 1) O excesso de poro-pressão inicial u_0 é uniforme através da camada de solo.

$$u_r = u_0 \quad \text{para} \quad r_w < r < r_e \quad \text{quando} \quad t = 0.$$

- 2) O excesso de poro-pressão na superfície do dreno ($u = u_w$) é nula quando $t > 0$.

$$u_h = 0 \quad \text{para} \quad u = u_w \quad \text{quando} \quad t > 0.$$

- 3) A superfície externa da zona de influência é impermeável (no ensaio é a parede da célula de adensamento).

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad \text{para} \quad u = u_e \quad \text{quando} \quad t \geq 0.$$

Para as condições acima, Barron chegou a seguinte solução:

$$u_h = u_0 \sum_{a_1, a_2, a_3 \dots}^{\infty} \frac{-2 A_1(a) \cdot A_0\left(\frac{ar}{r_w}\right)}{a \left[n^2 \cdot A_0^2(an) - A_1^2(a) \right]} e^{-4a^2 n^2 T_h}$$

$$\bar{u}_h = u_0 \sum_{a_1, a_2, a_3 \dots}^{\infty} \frac{4 A_1^2(a)}{a^2 (n^2 - 1) \left[n^2 A_0^2(an) - A_1^2(a) \right]} e^{-4a^2 n^2 T_h}$$

onde:

$$A_1(a) = J_1(a) \cdot y_0(a) - y_1(a) \cdot J_0(a)$$

$$A_0(an) = J_0(an) \cdot y_0(a) - y_0(an) \cdot J_0(a)$$

$$A_0\left(\frac{a\kappa}{\kappa_w}\right) = J_0\left(\frac{a\kappa}{\kappa_w}\right) \cdot y_0(a) - y_0\left(\frac{a\kappa}{\kappa_w}\right) \cdot J_0(a)$$

J_0 e J_1 são as funções de Bessel de primeira espécie, de ordem zero e primeira ordem, respectivamente.

y_0 e y_1 são as funções de Bessel de segunda espécie de ordem zero e primeira ordem, respectivamente.

$a_1, a_2, a_3 \dots$ são raízes das funções de Bessel que satisfazem a equação

$$J_1(an) \cdot y_0(a) - y_1(an) \cdot J_0(a) = 0$$

e

$$n = \frac{\kappa_e}{\kappa_w} = \frac{D}{d}$$

T_h é o fator tempo para o adensamento por escoamento radial.

$$T_h = \frac{Kh(1+e)t}{a_v \gamma_w D^2} = \frac{C_{vr} \cdot t}{D^2} \quad \text{com} \quad C_{vr} = \frac{Kh(1+e)}{a_v \gamma_w}$$

Kh é o coeficiente de permeabilidade horizontal

C_{vr} é o coeficiente de adensamento radial.

O grau médio de adensamento para toda a camada será:

$$\bar{u}_r = 1 - \frac{\bar{u}_r}{u_0} = 1 - \sum_{a_1, a_2, a_3}^{a = \infty} \frac{4 A_1^2(a) e^{-4a^2 n^2 T_h}}{a^2 (n^2 - 1) [n^2 A_0^2(an) - A_1^2(a)]}$$

Se a consolidação ocorre por escoamento vertical e radial, o grau médio de adensamento ($\bar{u}_{r,z}$), pode ser deduzido da seguinte maneira:

$$\bar{u}_r = 1 - \frac{\bar{u}_r}{u_0} \text{ (grau médio de adens., radial) } \therefore \bar{u}_r = u_0 (1 - \bar{u}_r)$$

$$\bar{u}_z = 1 - \frac{\bar{u}_z}{u_0} \text{ (grau médio de adeus, vertical) } \therefore \bar{u}_z = u_0 (1 - \bar{u}_z)$$

Segundo N. CARRILLO

$$\bar{u}_{h,z} = \frac{\bar{u}_h \times \bar{u}_z}{u_0}$$

e a porcentagem média de adensamento será:

$$\bar{u}_{h,z} = 1 - \frac{\bar{u}_{h,z}}{u_0}$$

por substituições, obtêm-se:

$$\bar{u}_{h,z} = 1 - \frac{u_0 [(1 - \bar{u}_h) (1 - \bar{u}_z)]}{u_0}$$

$$\therefore \bar{u}_{h,z} = 1 - (1 - \bar{u}_h) (1 - \bar{u}_z) \quad \text{ou} \quad (1 - \bar{u}_{h,z}) = (1 - \bar{u}_h) (1 - \bar{u}_z)$$

b) Caso de Deformações Verticais Iguais.

Pela condição de livre deformação, os recalques da superfície não influem na distribuição de carga para o solo. Contudo, o fato de que a consolidação progride mais rápido às proximidades do dreno, causando, portanto, maiores recalques naquela região, pode muito bem provocar uma redistribuição de carga na superfície, a qual será tanto mais acentuada quanto maior a tendência de arqueamento do terreno através das depressões originadas pelos recalques diferenciais.

Um caso extremo pode acontecer quando o processo de arqueamento redistribui a carga na superfície de tal maneira que todas as deformações verticais sejam iguais, não ocorrendo, portanto, recalques diferenciais. Condição esta um pouco severa, e que pode ser obtida em laboratório pelo uso de uma placa de carregamento rígida, e provavelmente no campo se a razão de H para D tiver valor considerável.

Supondo as mesmas condições de fronteira anteriores, BARRON¹ obteve a seguinte solução para este caso:

$$u_r = \frac{4 u_0 e^{\lambda}}{D^2 F(n)} \left[\frac{D^2}{4} \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \right]$$

D é o diâmetro da zona de influência

r_w é o raio do dreno

r é o valor da distância radial

sendo

$$\lambda = - \frac{8 T_h}{F(n)}$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

a sôbrepressão hidrostática média é:

$$\bar{u}_r = u_0 e^{-\left[\frac{8T_h}{F(n)}\right]} = u_0 e^{\lambda}$$

e a porcentagem de adensamento média:

$$\bar{u}_r \% = \left(1 - \frac{\bar{u}_r}{u_0}\right) \times 100 = \left(1 - e^{-\left[\frac{8T_h}{F(n)}\right]}\right) \times 100$$

COMPARAÇÃO ENTRE AS SOLUÇÕES:

Segundo RICHART ⁹ , a diferença entre os resultados obtidos para os dois casos é muito pequena, particularmente para valores de n maiores que 10. Para $n=5$ a discrepância é um pouco acentuada no início do adensamento, tornando-se cada vez menor a partir de 50% da consolidação.

RICHART ⁹ , cita ainda que, sendo os resultados quase idênticos, mas o tempo necessário para avaliar a equação do primeiro caso ("free strain") é da ordem de 10 a 50 vezes o necessário para avaliar a segunda solução, então a solução para o caso de deformações iguais, é preferível. BARRON também recomenda o uso da solução para o caso de deformações verticais iguais.

NOTA: Estas observações não se referem a cálculo através de computadores.

3.4 - Efeito do "Smear"

A zona de amolgamento ou "smear" criada na periferia do dreno, oferece uma resistência adicional ao escoamento

água, causando um retardamento na velocidade de consolidação. Tal zona não terá espessura constante e nem tampouco será homogênea; contudo, a fim de obter soluções para o caso, Barron assumiu que a espessura da zona de "smear" seja constante e homogênea.

Estando a zona de "smear" próxima ao dreno, adensará mais rapidamente. Em vista disto, BARRON¹ considerou que sua consolidação pode ser ignorada e a zona tratada como se fôsse de material incompressível.

Então na zona de "smear" a equação de adensamento radial torna-se:

$$\frac{K_s}{\gamma_w} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u'}{\partial r} + \frac{\partial^2 u'}{\partial r^2} \right) = \frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u'}{\partial t} = 0$$

u' é a sobrepressão hidrostática em um ponto na zona de "smear".

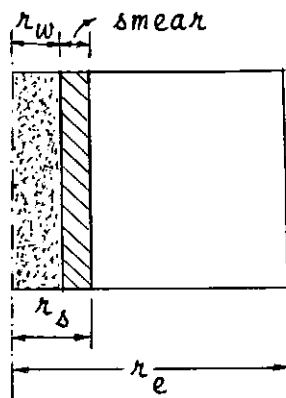
K_s é o coeficiente de permeabilidade na zona de "smear".

$$\frac{1}{r} \frac{\partial u'}{\partial r} + \frac{\partial^2 u'}{\partial r^2} = 0$$

cuja solução fornece a variação do excesso de poro-pressão no interior da zona de "smear".

$$u'_r = u'_{r,\delta} \left[\frac{\ln \left(\frac{r}{r_w} \right)}{\ln(\delta)} \right]$$

onde $u'_{r,\delta}$ é o excesso de poro-pressão no limite da zona de "smear".



$$\delta = \frac{r_s}{r_w}$$

r_s = raio da zona de "smear"

r_w = raio do dreno

r_e = raio da zona de influência

Nota-se que para um valor $\delta=1$, significa dizer que não há zona de "smear".

Se $\frac{K_h}{K_s} = 1$, vale dizer que a zona de "smear" não modifica as características do escoamento para o dreno.

Outras condições de fronteira que se fazem necessárias pela presença de uma zona de "smear" são:

19) O excesso de poro-pressão no limite da zona de "smear" deve ter um único valor. Isso implica em que:

$$u_{r,s} = u'_{r,s} \quad \text{quando} \quad r = r_s$$

$u_{r,s}$ é o excesso de poro-pressão em r_s pelo lado da zona sem amolgamento.

$u'_{r,s}$ é o excesso de poro-pressão em r_s pelo lado da zona de "smear".

20) A velocidade de escoamento na interface da zona de "smear" com a zona sem amolgamento também deve ter um único valor. Logo:

$$\frac{K_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{K_s}{\gamma_w} \frac{\partial u'}{\partial r} \quad \text{para} \quad r = r_s$$

a) Caso de Deformações Livres

Considerando que a distribuição do excesso de poro-
-pressão inicial seja uniforme, e mais as condições de fron-
teira estabelecidas, Barron chegou à seguinte solução para
a equação de adensamento por escoamento radial para um dreno
central tendo uma zona de "smear" em sua periferia.

$$u_r = u_0 \sum_{a_1, a_2, a_3 \dots}^{a = \infty} \frac{-\frac{2}{as} A_1(as) A_0\left(\frac{ar}{r_w}\right)}{\frac{4}{\pi^2 a^2 s^2} - A_0^2(as) - A_1^2(as)} e^{-4a^2 n^2 T_h}$$

na qual

$$A_0(as) = J_0(as) Y_1(an) - J_1(an) Y_0(as)$$

$$A_1(as) = J_1(as) Y_1(an) - J_1(an) Y_1(as)$$

$$A_0\left(\frac{ar}{r_w}\right) = J_0\left(\frac{ar}{r_w}\right) Y_1(an) - J_1(an) Y_0\left(\frac{ar}{r_w}\right)$$

As funções J_0 e J_1 são as funções de Bessel de pri-
meira espécie de ordem zero e primeira ordem, respectivamen-
te.

y_0 e y_1 são as funções de Bessel de segunda espécie de ordem zero e primeira ordem, respectivamente.

$a_1, a_2, a_3 \dots$ são as raízes da equação

$$\frac{K_s A_0(as)}{K_h as \ln(s)} + A_1(as) = 0$$

O excesso de poro-pressão média entre r_s e r_e é da do por:

$$\bar{u}_r = u_0 \sum_{a_1, a_2, a_3 \dots}^{a = \infty} \frac{A_1^2(as) e^{-4a^2 n^2 T_h}}{a^2 (n^2 - s^2) \left[\frac{4}{\pi^2 a^2 s^2} - A_0^2(as) - A_1^2(as) \right]}$$

b) Caso de Deformações Verticais Iguais

A solução de Barron para a consolidação por escoamento radial na direção de um dreno central tendo uma zona de "smear" em sua periferia, e considerando o caso de iguais deformações verticais é a seguinte:

$$u_h = u_0 e^{\xi} \frac{\left[\ln \left(\frac{n}{n_s} \right) - \frac{n^2 - n_s^2}{2 n_0^2} + \frac{K_h}{K_s} \left(\frac{n^2 - s^2}{n^2} \right) \ln(s) \right]}{v}$$

na qual

$$v = F(n, s, K_h, K_s) =$$

$$= \left[\frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \left(\frac{n}{s} \right) - \frac{3}{4} + \frac{s^2}{4n^2} + \frac{K_h}{K_s} \left(\frac{n^2 - s^2}{n^2} \right) \ln(s) \right]$$

$$\xi = \frac{-\delta T_h}{v}$$

a sobrepressão hidrostática média é dada por

$$\bar{u}_h = u_0 e^{-\frac{\delta T_h}{v}}$$

a porcentagem de adensamento média será:

$$\bar{u}_h \% = \left(1 - \frac{\bar{u}_h}{u_0} \right) \times 100 = \left(1 - e^{-\frac{\delta T_h}{v}} \right) \times 100$$

Barron cita que, com a finalidade de estudar o efeito do "smear" no retardamento da velocidade de consolidação, as equações obtidas para o caso de iguais deformações são preferidas em vista de sua simplicidade.

Comparando-se as soluções obtidas para o caso de iguais deformações verticais com e sem influência do "smear", nota-se que elas tornam-se idênticas quando $\delta=1$.

Richart⁹ considera que o efeito causado na consolidação do solo, pela consideração da existência de uma zona de "smear" na periferia do dreno, é idêntico ao efeito causado por uma redução no diâmetro do dreno. Através de uma combinação de valores para n , δ , $\frac{K_h}{K_\delta}$, Richart estabelece curvas que permitem o cálculo de drenos de diâmetro equivalente.

3.5 - Efeito da Resistência do Dreno ao Escoamento

As soluções anteriores foram para drenos de permeabilidade infinita, sem resistência ao escoamento. No entanto, sempre ocorrem perdas de carga devido a resistência ao escoamento através do material do dreno. A magnitude dessa perda de carga depende principalmente da velocidade de escoamento.

mento e do diâmetro do dreno. Se a velocidade é grande, ou a área do dreno é pequena, então a queda de pressão ao longo do dreno será grande. Por outro lado, se a velocidade de escoamento é pequena, ou se a área do dreno é grande, então a resistência do dreno ao escoamento será pequena.

Barron desenvolveu uma solução para o caso de iguais deformações verticais com ou sem efeito do "smear", para um material no qual não existe escoamento vertical ($K_v=0$), porém $\frac{\partial u}{\partial z} \neq 0$.

Considerando o efeito do "smear" e da resistência do dreno ao escoamento, Barron chegou à seguinte conclusão:

$$u_{r,z} = \bar{u}_z \left\{ \frac{f(z)}{v} \left[\ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2r_e^2} + \frac{K_h}{K_s} \left(\frac{r^2 - s^2}{n^2} \right) \ln(s) \right] + 1 - f(z) \right\}$$

na qual \bar{u}_z é o excesso de poro-pressão média entre r_e e r_s à profundidade z .

$$\bar{u}_z = u_0 e^{f(z)}$$

$$\phi(z) = \frac{e^{\beta(Z-2H)} + e^{-\beta z}}{1 + e^{-2\beta H}}$$

$$\beta = \left[\frac{2K_h(n^2 - s^2)}{K_w r_e^2 v} \right] \frac{1}{2}$$

$$v = F(n, s, K_h, K_s) = \left[\frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln\left(\frac{n}{s}\right) - \frac{3}{4} + \frac{s^2}{4n^2} + \frac{K_h}{K_s} \left(\frac{n^2 - s^2}{n^2} \right) \ln(s) \right]$$

K_w é o coeficiente de permeabilidade do material do dreno.

O excesso de poro-pressão médio total através da massa de solo entre r_e e r_s e entre $Z=0$ e $Z=H$ é:

$$\bar{\bar{u}} = \int_0^H \bar{u}_z dz$$

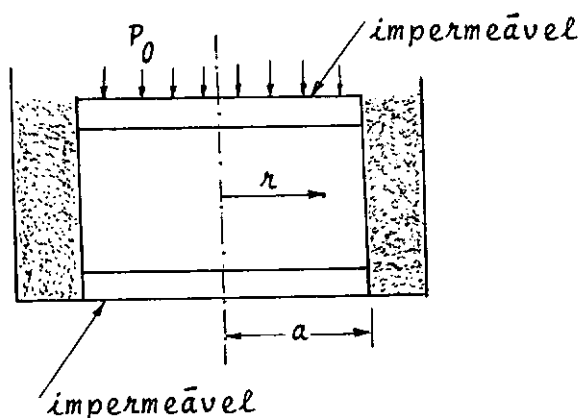
Nesta solução o escoamento horizontal no dreno foi ignorado. Quando não há "smear" $F(n, s, K_h, K_s)$ reduz a $F(n)$.

Em projetos práticos de drenos de areia, onde n va

ria aproximadamente de 7 a 15, para valores de $D/H < 1.0$ o efeito da resistência ao escoamento através do dreno é praticamente desprezível.

3.6 - Drenagem Radial Externa - Análise do Professor I CARAHI DA SILVEIRA.

O Professor SILVEIRA¹¹ considera o processo de consolidação mediante drenagem radial, em que o sentido de percolação da água é do centro para a periferia, isto é, a superfície drenante envolve externamente o corpo de prova argiloso, conforme mostra o esquema abaixo.



Segundo SILVEIRA¹¹, o problema em estudo é um caso típico de difusão em coordenadas cilíndricas, devendo as

pressões na água obedecerem às seguintes condições:

1) Na partida do processo de adensamento ($t=0$), para qualquer ponto do cilindro ($0 \leq r \leq a$), a pressão neutra é $p_0 = u_0 = \text{constante}$.

2) Durante o processo de consolidação ($t>0$), e ao longo da superfície do cilindro ($r=a$), a pressão neutra mantém-se nula ($u=0$).

3) Durante o processo de consolidação ($t>0$), no eixo do cilindro ($r=0$), a derivada $\frac{\partial u}{\partial r} = 0$.

4) Durante o processo de consolidação, para qualquer ponto do cilindro ($0 < r < a$), a variação da pressão neutra é dada por:

$$c_v r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}$$

cuja solução é feita através de separação de variáveis e aplicação da transformada de Laplace. As constantes de integração são determinadas a partir das **condições** de fronteiras do problema e desenvolvimento em série de Fourier-Bessel.

A expressão encontrada por SILVEIRA¹¹ para a variação de u com o raio e o tempo \bar{e} :

$$u_{re} = u_0 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2J_0\left(\frac{\beta_n r}{a}\right)}{nJ_1(\beta_n)} e^{-\frac{\beta_n^2 C_{vr} t}{a^2}}$$

onde β_n são raízes da equação de condição dada por

$$J_0(\beta_n) = 0$$

cujo número de raízes \bar{e} infinito.

O grau médio de adensamento \bar{e} dado pela integral

$$\bar{u}_{re} = \frac{m_v \int_0^{2\pi} \int_0^a (u_0 - u) r dr d\theta}{m_v u_0 \pi a^2}$$

(m_v \bar{e} o coeficiente de perda d'água intersticial), cuja solução \bar{e} :

$$\bar{u}_{re} = 1 - 4 \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{e^{-\frac{\beta_n^2 C_{vr} t}{a^2}}}{\beta_n^2}$$

Esta expressão foi computada por BARROS² (1951), que apresentou em gráfico a variação de \bar{u}_{he} com o fator tempo

$$T_h = \frac{C_{vh} t}{a^2} \quad .$$

Citamos também o trabalho de MARTINS^{1,2} que apresenta o cálculo, através de computação eletrônica, do grau médio de consolidação primária de um solo argiloso saturado, através de um ensaio triaxial em que a amostra cilíndrica é envolvida parcialmente por tiras drenantes na superfície exterior. Trata-se de um problema de difusão radial com condições variáveis ao longo da fronteira.

CAPÍTULO II

PROGRAMAÇÃO AUTOMÁTICA

1. INTRODUÇÃO.

O projeto de drenos verticais de areia em solos argilosos, exige o conhecimento do coeficiente de permeabilidade horizontal, o qual é geralmente maior que o vertical, e tanto maior quanto mais estratificado se apresentar o solo.

A determinação do coeficiente de permeabilidade horizontal, pode ser feita em laboratório, através de um ensaio de adensamento por escoamento radial em direção a um dreno executado no eixo da amostra. O cálculo desse coeficiente, a partir das curvas tempo-recalque do ensaio, requer o conhecimento da curva Teórica Porcentagem de Adensamento "versus" Fator Tempo, de adensamento radial, para a relação de diâmetros em questão. Nos trabalhos conhecidos, como os de BARRON¹ ou RICHART⁹, as curvas existentes são para apenas poucos e determinados valores da relação de diâmetros.

Destina-se este trabalho, a apresentar um programa,

em linguagem FORTRAN, para computação, por processo eletrônico, das curvas teóricas Porcentagem de Adensamento média "versus" Fator Tempo, de adensamento radial, para qualquer valor da relação de diâmetros (círculo de influência: dreno). É abordada a solução de BARRON ¹ para o caso muito simples de deformações iguais (condição obtida em laboratório) e também a solução bastante complexa do caso de livre deformação (condição que se aproxima a de campo).

2. DETALHES DA PROGRAMAÇÃO.

O valor da pressão neutra média durante o processo de adensamento por escoamento radial, para um dreno de areia central, é dado através da fórmula:

$$u_r = u_0 \sum_{a_1, a_2, a_3 \dots}^{a = \infty} \frac{-4a^2 n^2 T_h}{a^2 (n^2 - 1)} \times$$

$$\times \frac{[J_1(a) \cdot y_0(a) - y_0(an) \cdot J_0(a)]^2}{\left\{ n^2 [J_0(an) \cdot y_0(a) - y_0(an) \cdot J_0(a)]^2 - [J_1(a) \cdot y_0(a) - y_1(a) \cdot J_0(a)]^2 \right\}}$$

onde $a_1, a_2, a_3 \dots$ são raízes da equação de condição dada por:

$$J_1(an) \cdot Y_0(a) - Y_1(an) \cdot J_0(a) = 0.$$

$J_0(a)$ é a função de Bessel de 1a. espécie e de ordem zero.

$J_1(a)$ é a função de Bessel de 1a. espécie e de 1a. ordem.

$Y_0(a)$ é a função de Bessel de 2a. espécie e de ordem zero.

$Y_1(a)$ é a função de Bessel de 2a. espécie e de 1a. ordem.

Fazendo na equação de condição $x=an$, d'onde $a = \frac{x}{n}$,
virã:

$$J_1(x) \cdot Y_0\left(\frac{x}{n}\right) - Y_1(x) \cdot J_0\left(\frac{x}{n}\right) = 0.$$

Então, desde que sejam obtidos os valores de x que satisfaçam a equação de condição para um dado valor de n , re-
torna-se a equação $a = \frac{x}{n}$, calculando-se para cada valor de x
o correspondente valor de a . De posse dos valores de a , é
possível então desenvolver-se a série que dá o valor da pres-
são neutra. Fazendo-se nesta série $\frac{\bar{u}_n}{u_0} = xM$, e tôdas as de

mais simplificações possíveis, obtêm-se:

$$\frac{\bar{u}_h}{u_0} = XM = \sum_{i=1}^{i=\infty} p_i e^{q_i T_h}$$

$$\frac{\bar{u}_h}{u_0} = XM = p_1 e^{q_1 T_h} + p_2 e^{q_2 T_h} + p_3 e^{q_3 T_h} + \dots$$

De modo que obtidos os valores de p_i e q_i (existindo um valor de p e de q para cada raiz da equação de condição), pode-se atribuir valores a T_h desde zero até ∞ , ou de maneira prática desde 0.001 até 0.9 (valor de T_h para o qual geralmente mais de 90% da consolidação já foi atingida). A somatória dará o valor correspondente de XM .

Tendo-se XM , calcula-se a porcentagem de adensamento média através da expressão:

$$\bar{u}_h = \left(1 - \frac{\bar{u}_h}{u_0}\right) \times 100 = (1 - XM) \times 100.$$

Para o caso de iguais deformações verticais, a pressão neutra média durante o adensamento, é dada pela fórmula muito simples

$$\bar{u}_n = u_0 e^{\lambda}, \quad \text{sendo} \quad \lambda = \frac{-8T_h}{F(n)} \quad e$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

cuja marcha de cálculo dispensa comentários. Os valores do grau médio de adensamento são calculados como no caso anterior, isto é, atribuindo-se valores a T_h , e fazendo-se

$$\frac{\bar{u}_n}{u_0} = XM, \quad \text{d'onde} \quad \bar{u}_n = (1 - XM) \times 100.$$

3. APRESENTAÇÃO E UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA.

O desenvolvimento explicado serviu de base para elaboração do programa, o qual consta de 3 partes importan

tes: O programa principal e dois subprogramas; um para cálculo das raízes da equação de condição (subrotina zeros) e outro para cálculo dos coeficientes p e q da série convergente (subrotina Coef).

OBS: Estas duas subrotinas são auxiliares para o cálculo do caso de deformações livres.

a) Programa Principal.

A partir dos valores de entrada, o programa principal executa o cálculo para o caso de Deformações Livres ou Deformações Iguais, conforme o comando dado. Tratando-se do primeiro caso, o cálculo será desviado para as subrotinas auxiliares. Em seguida é executado o cálculo das Porcentagens de Adensamento correspondentes aos diversos valores adotados para o Fator Tempo, e o traçado da curva correspondente.

Os dados de entrada são:

EPSLO valor da precisão adotada no cálculo das raízes da equação de condição.

- NR Número de raízes adotadas no cálculo da e
 quação de condição.
- NN Número de relações de diâmetro.
- $\{N(J), J=1, NN\}$.. Valores das relações de diâmetro adotadas.
- KD Variável inteira que comanda o tipo de pro
 blema a ser executado. $KD = 0$ corresponde
 ao caso de Deformações Livres. $KD \neq 0$ cor
 responderá ao caso de Deformações Iguais.
- Kp Variável inteira que comanda a execução da
 "Plotter". Se fôr nula o "Plotter" será
 executado; se não, será omitido.

Para efeito de "Plotagem" entra-se com:

- NTH Número de fatôres tempo.
- NUR Número de Porcentagens de Adensamento.

Observações:

Para a construção da escala logarítmica de 3 ci
 clos, deve-se adotar $NTH=27$. Para construção da escala deci

mal usa-se $NUR = 11$.

O número de problemas executados está em função do valor adotado para NN .

b) Subrotina Zeros.

Calcula as raízes da equação de condição

$$J_1(x) \cdot Y_0\left(\frac{x}{n}\right) - Y_1(x) \cdot J_0\left(\frac{x}{n}\right) = 0.$$

As raízes dessa equação são calculadas por aproximações sucessivas até ser atingida a precisão exigida.

As funções de Bessel encontram-se entre as subrotinas científicas da I.B.M.. Tais subrotinas podem ser chamadas através dos seguintes parâmetros:

$BESJ(X, N, BJ, D, IER)$ (Bessel 1a. espécie)

$BESY(X, N, BY, IER)$ (Bessel 2a. espécie)

X é o argumento da função de Bessel desejada.

N é a ordem da função de Bessel.

BJ ou BY valor da função de Bessel calculada.

D precisão exigida.

O comentário final e o diagrama de blocos desta subrotina esclarecem melhor seu desenvolvimento.

c) Subrotina COEF.

Com os valores das raízes da equação de condição, esta subrotina calcula os coeficientes da série convergente

$$\sum_{i=1}^{i=1} p_i e^{q_i T h}$$

A cada raiz da equação de condição corresponde um coeficiente p e um coeficiente q .

O diagrama de blocos mostra o roteiro seguido na

execução desta subrotina.

4. CARTÕES DE DADOS E RESULTADOS.

Os FORMAT foram preparados de tal maneira que os cartões de dados sejam ao todo 2, permitindo cada compilação uma execução de problemas com no máximo 15 valores diferentes da relação de diâmetros n .

Todos os títulos do trabalho são escritos diretamente a partir do programa principal ou das subrotinas.

Já tendo sido esclarecido o significado da notação, o quadro abaixo encerra a ordem das variáveis nos cartões de dados.

Número de cartões	Dados dos cartões na ordem que devem ser fornecidos	FORMAT
1	EPSLO, NN, NR, NTH, NUR, KP, KD	F15.9, 6I5
1	(N(J), J = 1, NN)	15F5.1

Os resultados de cada problema contêm:

Uma tabela contendo os valores das raízes da equação de con
dição.

Uma tabela com os valores dos coeficientes p e q da série
convergente.

Um quadro contendo os valores das relações \bar{u}_n/u_0 anotados
como XM , os valores das porcentagens de adensamento (UR) e
dos fatores tempo (TH) correspondentes.

O gráfico da curva característica do problema.

5. CONSIDERAÇÕES DE MEMÓRIA E TEMPO DE EXECUÇÃO.

O programa fornecido, está adaptado para o computaa
dor IBM-1130 de 32K de memória interna. Durante a compilaa
ção do programa, o computador acusou a não utilização de
21.580 palavras de memória. Como a memória interna utilii
zável do IBM-1130 de 32K é em torno de 28.000 palavras, verii
fica-se que sômente 6420 posições de memória foram ocupaa
das. O número relativamente pequeno de posições de memória

ocupadas, torna-se explicável tendo em vista que as variáveis subscritas do programa (as que ocupam maior espaço de memória) são tôdas representantes de conjuntos com sômente uma dimensão.

O tempo de computação do programa está na dependência dos equipamentos disponíveis e da capacidade do computador.

No computador IBM-1130 do NCE-UFRJ com leitora 2501 e impressora 1403, os tempos de compilação e execução foram os seguintes:

Tempos de compilação

compilação da subrotina zeros = 30 seg.

compilação da subrotina Coef = 25 seg.

compilação do programa principal = 2 min.

Tempo de execução

Caso de deformações livres:

Ao contrário do que sucede com a memória utilizada, a qual é pequena, o tempo de execução do programa neste caso, é relativamente demorado, principalmente em virtude das aproximações sucessivas feitas no cálculo de cada raiz da equação de condição. Tal tempo é também função do valor da precisão Epslom em uso, do número de raízes e, como é natural, do número de problemas resolvidos com uma compilação.

Para a execução de cada problema, isto é, para um dado valor da relação de diâmetros n , foram gastos os seguintes tempos para as precisões utilizadas:

$$\underline{\text{precisão Epslom} = 1.0 \text{ E-6}}$$

Tempo de execução = 22 min.

Tempo de "plotagem" = 9 min.

Tempo total = 31 min.

$$\underline{\text{precisão Epslom} = 1.0 \text{ E-4}}$$

Tempo de execução = 16 min.

Tempo de "plotagem" = 9 min.

Tempo total = 25 min.

precisão Eps_{lom} = 1.0 E-3

Tempo de execução = 11 min.

Tempo de "plotagem" = 9 min.

Tempo total = 20 min.

Como o número de problemas executados está em função da variável NN , o tempo total gasto será obtido multiplicando NN pelo tempo gasto para um problema.

Observação: Os tempos acima foram todos obtidos com o uso de 15 raízes da equação de condição, estando sujeitos a variações caso seja usado outro número de raízes.

Caso de deformações iguais:

Em se tratando de uma solução muito simples, o tempo de execução de cada problema é bastante pequeno. O observado foi da ordem de 3 minutos.

6. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES.

a) Método de Cálculo das Raízes da Equação de Condição.

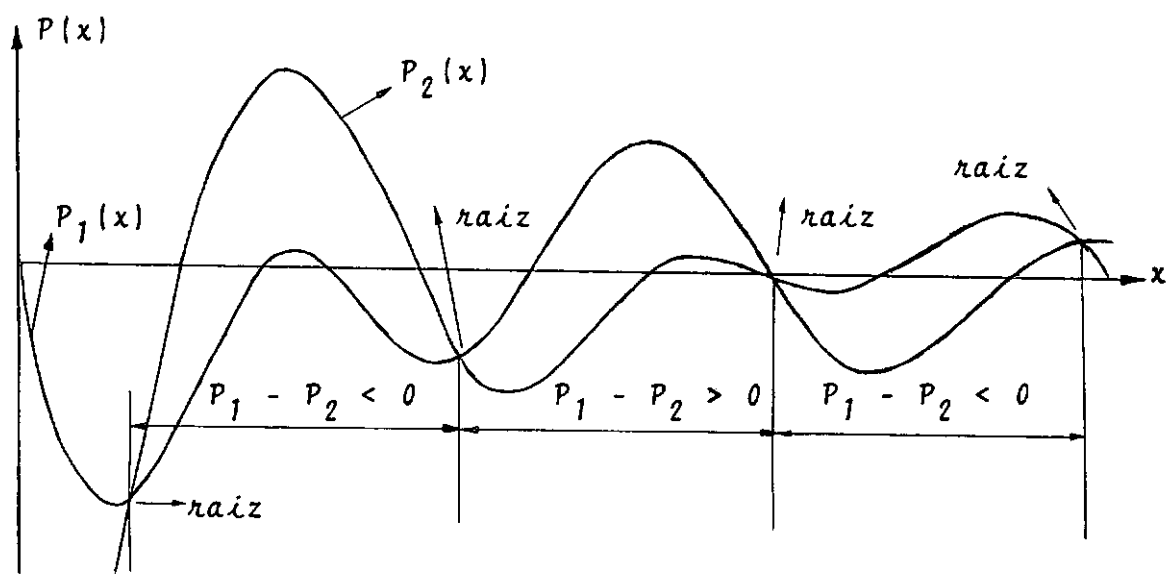
$$J_1(x) \cdot y_0\left(\frac{x}{n}\right) - y_1(x) \cdot J_0\left(\frac{x}{n}\right) = 0,$$

são admitidos os produtos

$$P_1(x) = J_1(x) \cdot y_0\left(\frac{x}{n}\right)$$

$$P_2(x) = y_1(x) \cdot J_0\left(\frac{x}{n}\right),$$

cuja curvas são semelhantes às mostradas abaixo:



Foram executados programas experimentais, em que, partindo-se de um valor inicial de x , e incrementando-o continuamente, calculavam-se apenas as funções $P_1(x)$, $P_2(x)$ e a diferença entre elas. Verificou-se que essa diferença era periodicamente positiva e periodicamente negativa, portanto, existindo uma raiz para cada mudança de sinal de diferença.

O cálculo das raízes por aproximações sucessivas, depende basicamente da mudança periódica de sinal da diferença $P_1(x) - P_2(x)$, a qual serve de referência ao valor do incremento delta que deve ser dado a X , e até que se alcance a precisão exigida.

Os valores iniciais de X e $DELTA$ foram fixados em 0.1 e 0.5, respectivamente. O valor de $DELTA$ é dividido por 10 sempre que ocorre mudança de sinal na diferença $P_1(x) - P_2(x)$. A divisão por 10 continua até que seja alcançado o valor da raiz com a precisão adotada, quando então, o valor de $DELTA$ retorna a ser 0.5, iniciando-se o cálculo de nova raiz.

b) Precisão Epslom.

Esperava-se que o valor da precisão adotada, no cálc

culo das raízes da equação de condição, tivesse grande influência nos valores das porcentagens de adensamento. Por isso, pensou-se a princípio em adotar somente a precisão de 1.0 E-6 . No entanto, fixado um valor para $n(n=5.0)$, foram experimentadas outras precisões, e verificou-se que os valores finais pouco variavam quando comparados aos obtidos para a precisão de 1.0 E-6 .

Foram então executados problemas para as precisões de 1.0 E-4 , 1.0 E-3 e 1.0 E-2 . A seguir, são apresentados, para efeito de comparação, os resultados obtidos com as precisões acima mencionadas. (Tabela pág. 66).

Pode-se observar, que para um mesmo valor de TH , os valores obtidos para UR , com o uso de diferentes precisões, pouco se afastam um do outro, principalmente a medida que o valor de TH cresce (pois a série que dá o valor da pressão neutra converge tanto mais rápido quanto maior o TH). Para precisões de 1.0 E-6 , 1.0 E-4 , 1.0 E-3 , os resultados são todos bastante próximos um do outro, com pequenas diferenças que são perfeitamente admissíveis. Para a precisão de 1.0 E-2 , as diferenças já se acentuam um pouco mais, principalmente para os valores menores de TH .

Conclui-se então, ser possível o uso de precisões

VALORES DAS PORCENTAGENS DE ADENSAMENTO OBTIDAS COM DIFERENTES PRECISÕES NO CÁLCULO DAS RAÍZES DA EQUAÇÃO DE CONDIÇÃO.

RELAÇÃO DE DIÂMETROS $n = 5.0$

TH	UR% ($\epsilon = 1.0E-6$)	UR% ($\epsilon = 1.0E-4$)	UR% ($\epsilon = 1.0E-3$)	UR% ($\epsilon = 1.0E-2$)
0.001	3.369	3.359	3.302	2.956
0.002	4.983	4.973	4.916	4.571
0.003	6.303	6.293	6.236	5.893
0.004	7.469	7.459	7.403	7.060
0.005	8.536	8.526	8.470	8.129
0.006	9.532	9.522	9.466	9.126
0.007	10.473	10.464	10.408	10.070
0.008	11.372	11.363	11.307	10.970
0.009	12.235	12.226	12.170	11.835
0.01	13.068	13.059	13.004	12.669
0.02	20.377	20.368	20.315	19.993
0.03	26.649	26.641	26.590	26.280
0.04	32.317	32.309	32.259	31.962
0.05	37.516	37.508	37.461	37.176
0.06	42.308	42.300	42.255	41.982
0.07	46.730	46.722	46.679	46.418
0.08	50.812	50.805	50.764	50.514
0.09	54.581	54.575	54.535	54.297
0.1	58.062	58.056	58.018	57.791
0.2	81.104	81.100	81.078	80.943
0.3	91.486	91.484	91.471	91.396
0.4	96.164	96.163	96.156	96.115
0.5	98.271	98.271	98.267	98.246
0.6	99.221	99.220	99.219	99.208
0.7	99.649	99.648	99.648	99.642
0.8	99.841	99.841	99.841	99.838
0.9	99.928	99.928	99.928	99.927

tais como 1.0 E-4 ou 1.0 E-3 , sem comprometimento dos resultados, obtendo-se conseqüentemente uma vantagem muito grande, que é a redução no que diz respeito ao tempo de execução dos problemas.

Entende-se que a principal causa da pequena variação entre os valores obtidos para precisões diferentes, esteja na escolha do incremento inicial ($\Delta=0.5$), dado ao valor de X no cálculo das raízes da equação de condição. Um valor menor para Δ , causaria um aumento ainda maior no tempo de execução. Valores maiores para Δ , permitiriam uma aproximação mais rápida aos valores das raízes, sem no entanto garantir bons resultados, principalmente no caso de uso de precisões como 1.0 E-3 ou 1.0 E-4 .

c) Número de raízes.

O número de raízes, tal como a precisão, tem sua influência sobre o tempo de execução e sobre os valores dos resultados.

Quanto menor o número de raízes adotadas, menor o tempo de execução. Por exemplo, para uma precisão de 1.0 E-4 e, adotando-se 8 (oito) raízes, observou-se uma redução

de aproximadamente 4 min. no tempo de execução.

A série

$$\frac{\bar{u}_h}{u_0} = X_M = \sum_{i=1}^{i=\infty} p_i e^{q_i T_h}$$

converge rapidamente, e tanto mais quanto maior o valor de T_h (pois q_i é negativo). Por essa razão, a variação do número de raízes não deverá se fazer sentir de maneira acentuada nos valores de X_M e, portanto, nos de \bar{u}_h .

Na fórmula

$$\bar{u}_h = 1 - \frac{\bar{u}_h}{u_0} = \sum_{i=1}^{i=\infty} p_i e^{q_i T_h}$$

para $\bar{u}_h = 0$ (lógicamente $T_h = 0$), a série $\sum_{i=1}^{i=\infty} p_i$ deverá convergir para o valor 1. Tal convergência é função do número de termos da série e, portanto, do número de raízes.

Para um problema com $n=5.0$, foram obtidos os seguintes resultados, considerados como muito bons:

$$15 \text{ raízes: } \sum_{i=1}^{i=15} p_i = 0.995$$

$$8 \text{ raízes: } \sum_{i=1}^{i=8} p_i = 0.991$$

$$4 \text{ raízes: } \sum_{i=1}^{i=4} p_i = 0.983$$

Apresentam-se a seguir, os resultados obtidos para uma precisão de $1.0 \text{ E-}4$ com o uso de 15 e 8 raízes, respectivamente. (Tabela pág. 70).

Pela observação do quadro, nota-se que as diferenças existentes entre os valores de UR são de pequena ordem, tornando-se ainda menores com o aumento de TH .

Embora, os problemas apresentados em apêndice para o caso de deformações livres, tenham sido executados com o uso de 15 raízes, admite-se que tal número é elevado com respeito ao tempo de execução. Como medida de economia de tempo, e sem comprometimento dos resultados finais, um número mais aconselhável seria o de 8 raízes.

VALORES DAS PORCENTAGENS DE ADENSAMENTO OBTIDAS PARA DIFE-
RENTES NÚMEROS DE RAÍZES DA EQUAÇÃO DE CONDIÇÃO.
RELAÇÃO DE DIÂMETROS $n = 5.0$

TH	UR% (15 raízes)	UR% (8 raízes)
0.001	3.3599	3.4440
0.002	4.9739	5.0342
0.003	6.2938	6.3340
0.004	7.4599	7.4837
0.005	8.5269	8.5486
0.006	9.5229	9.5411
0.007	10.4647	10.4807
0.008	11.3634	11.3777
0.009	12.2266	12.2391
0.01	13.0598	13.0710
0.02	20.3689	20.3785
0.03	26.6414	26.6490
0.04	32.3090	32.3153
0.05	37.5086	37.5141
0.06	42.3006	42.3050
0.07	46.7229	46.7261
0.08	50.8055	50.8083
0.09	54.5752	54.5760
0.1	58.0560	58.0573
0.2	81.1008	81.1016
0.3	91.4843	91.4848
0.4	96.1630	96.1632
0.5	98.2711	98.2711
0.6	99.2209	99.2209
0.7	99.6489	99.6489
0.8	99.8418	99.8418
0.9	99.9287	99.9287

7. DIAGRAMA DE BLOCOS E LISTAGEM DO PROGRAMA.

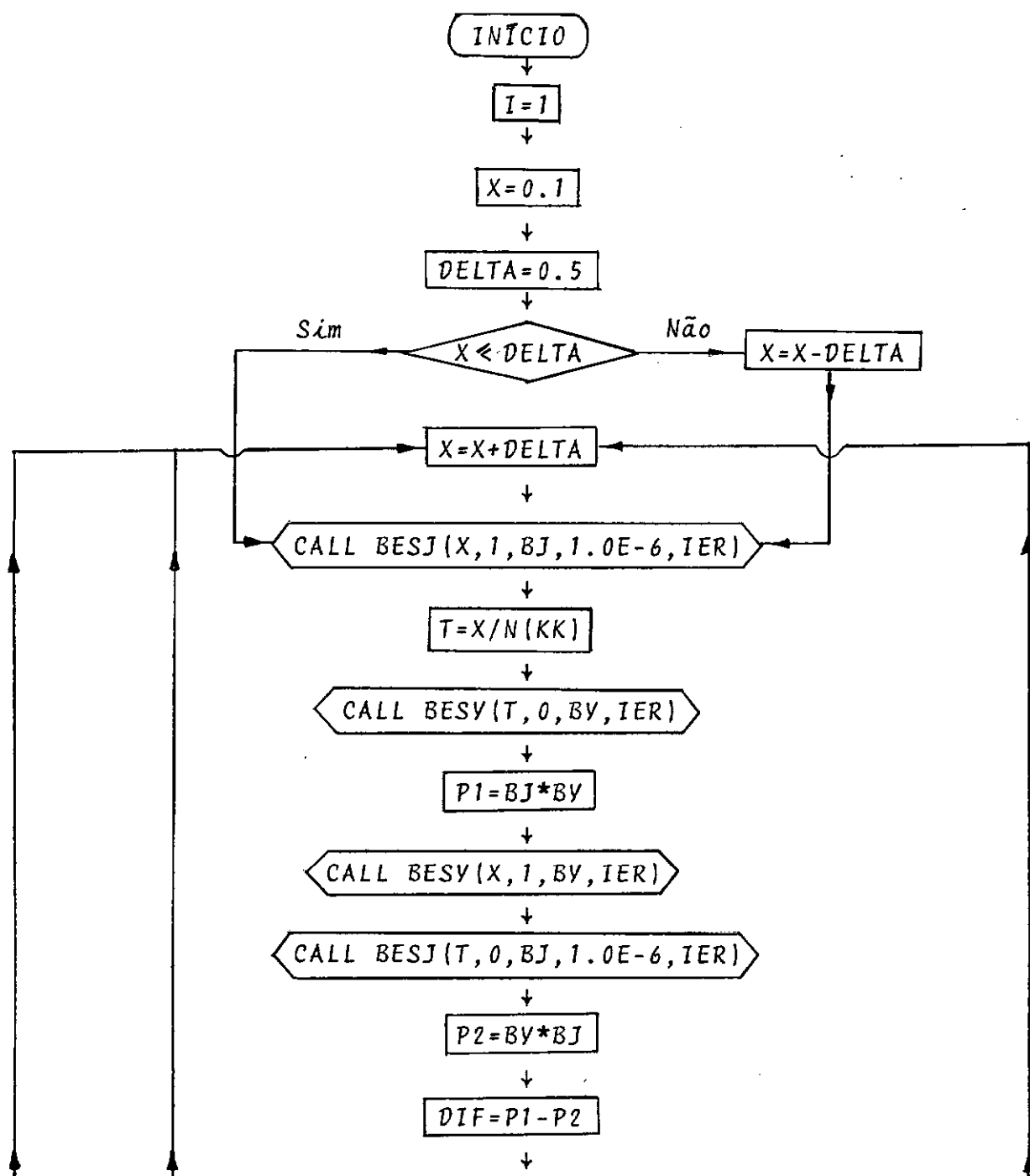
Considerações:

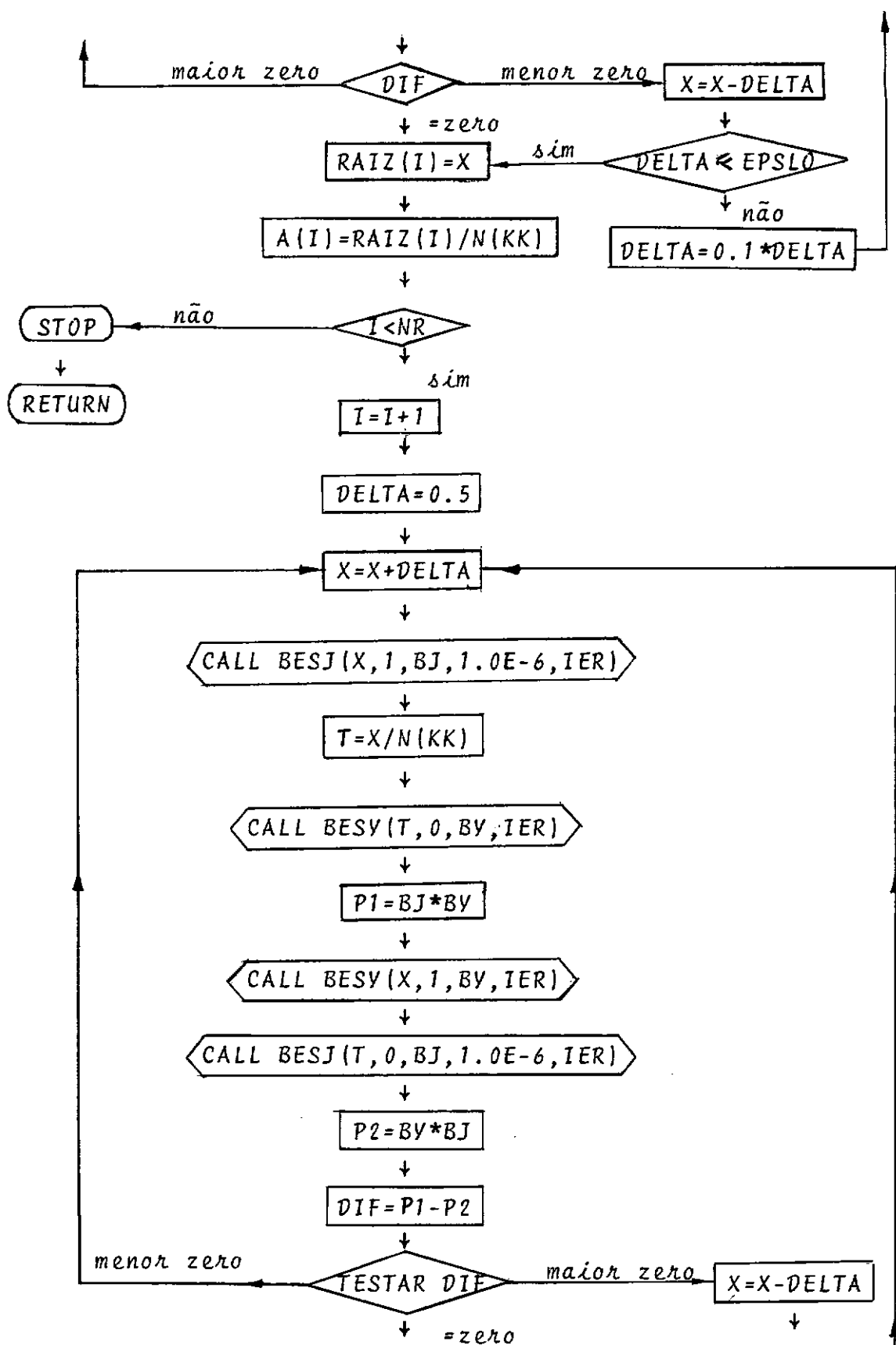
O diagrama de blocos foi desenvolvido adotando-se a mesma nomenclatura do PACITTI⁸, a qual é muito simples e de fácil interpretação.

São apresentados os diagramas de blocos do programa principal, abordando os casos de Deformações Livres e Deformações Iguais, e as duas subrotinas auxiliares na solução do primeiro caso.

A listagem do programa é apresentada em linguagem FORTRAN orientada para o Sistema 1130.

DIAGRAMA DE BLOCOS - SUBROTINA ZEROS





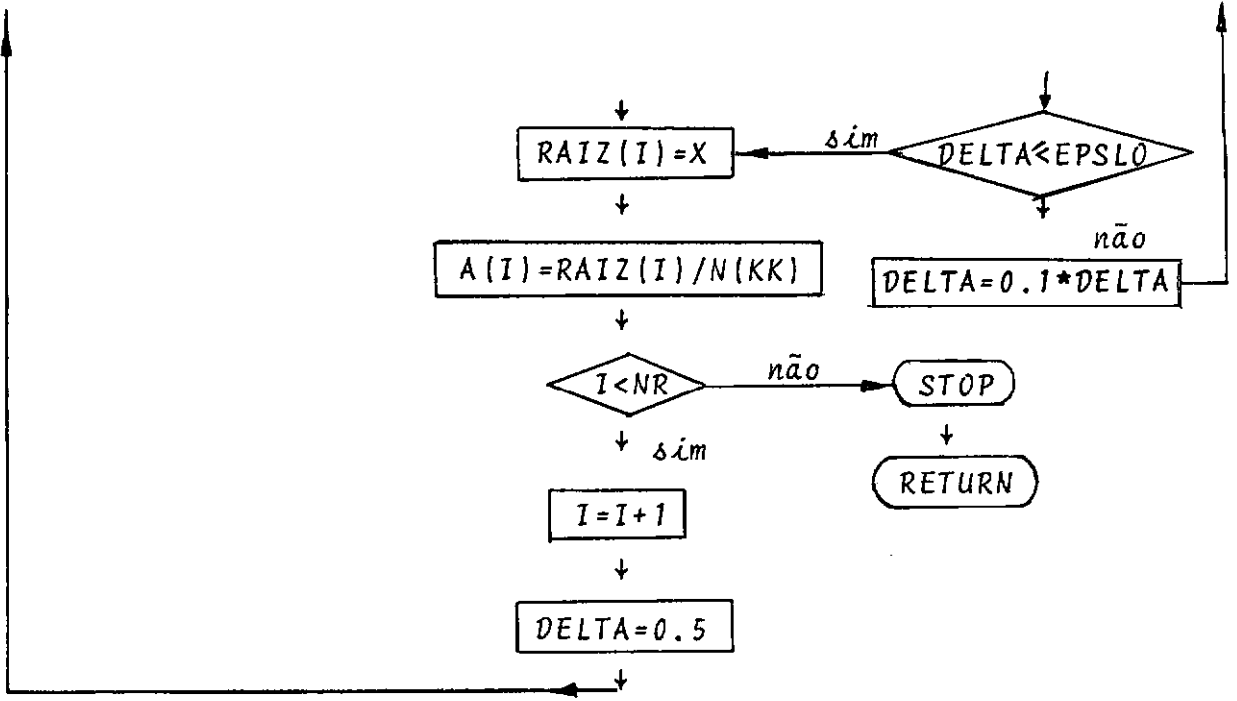
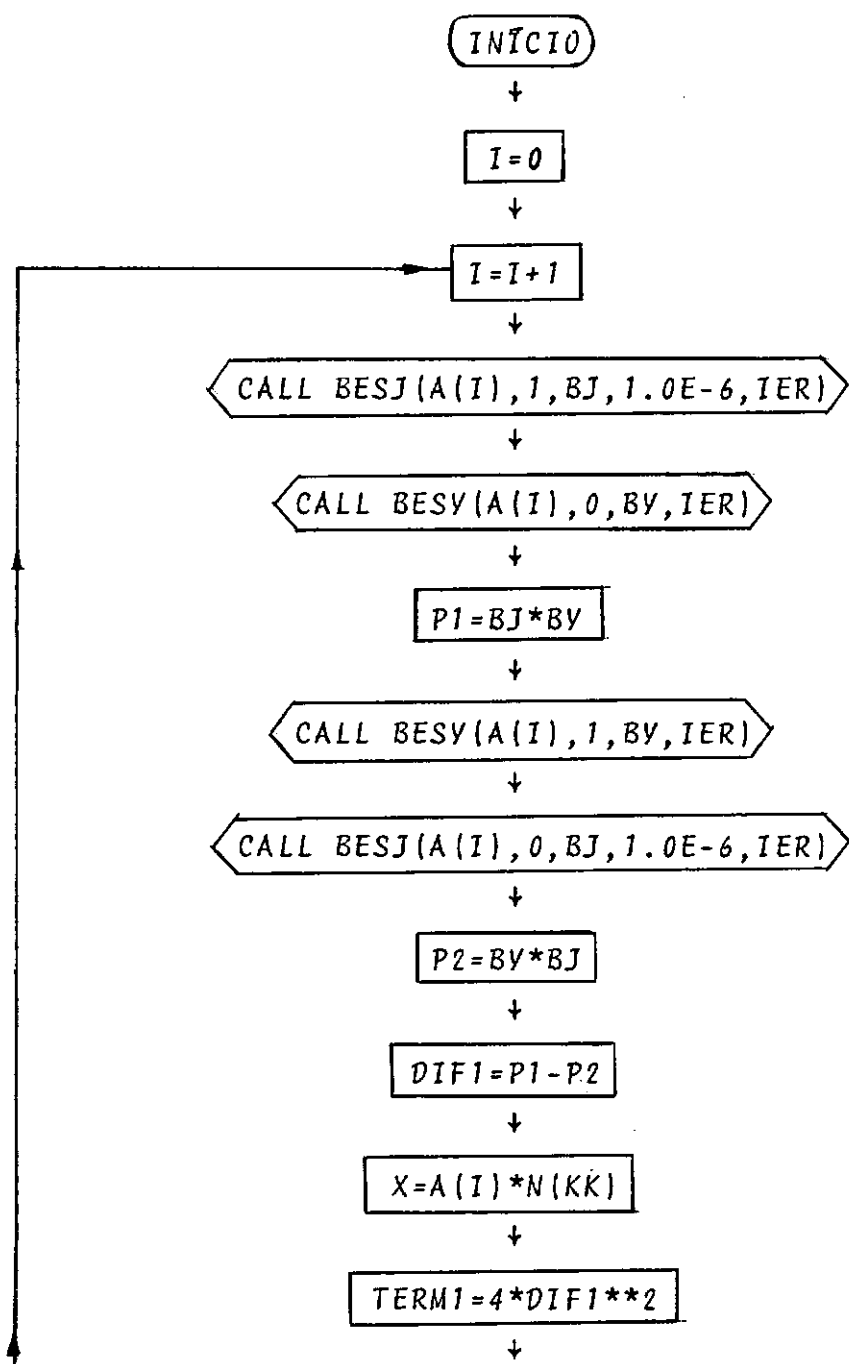
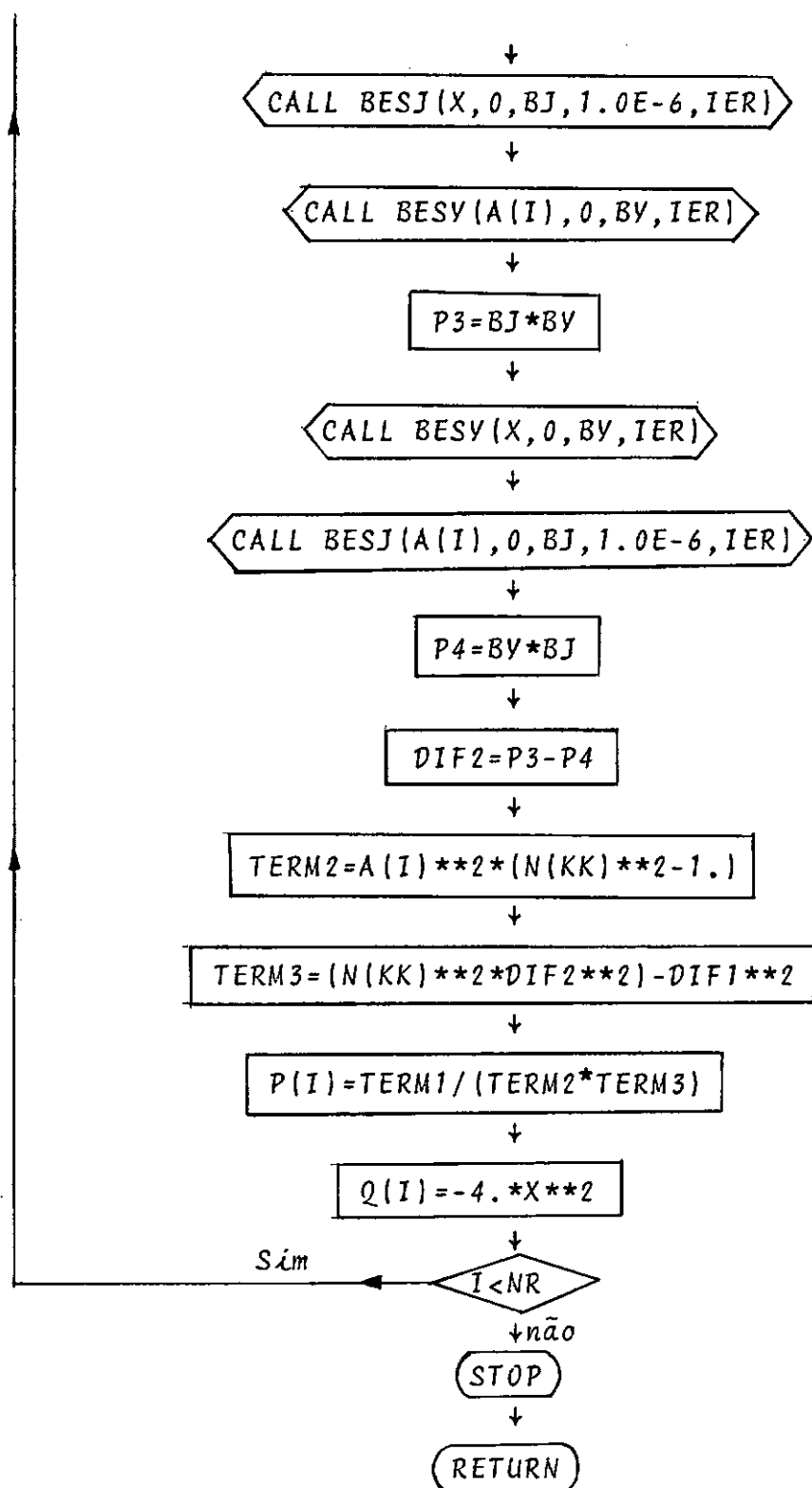
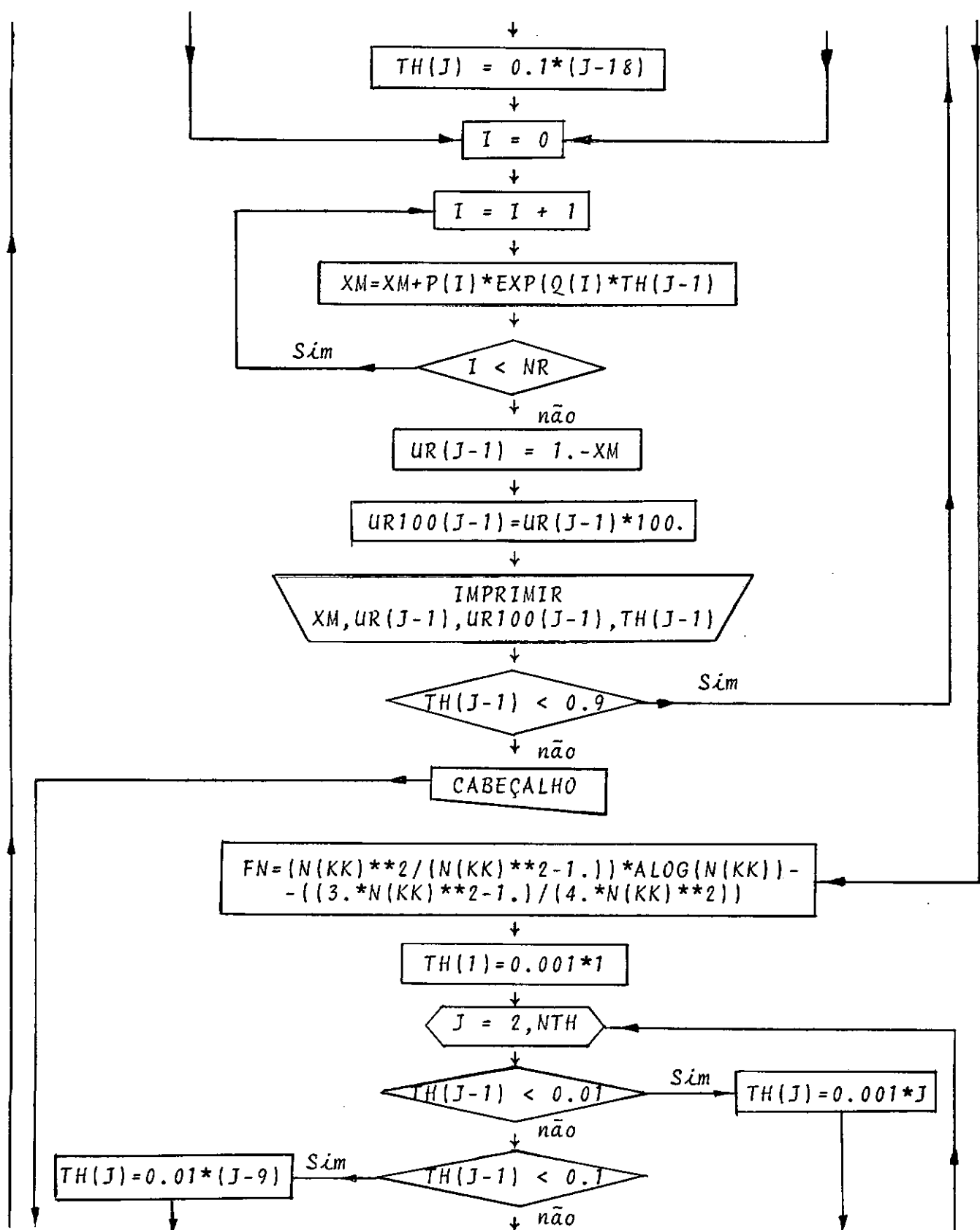
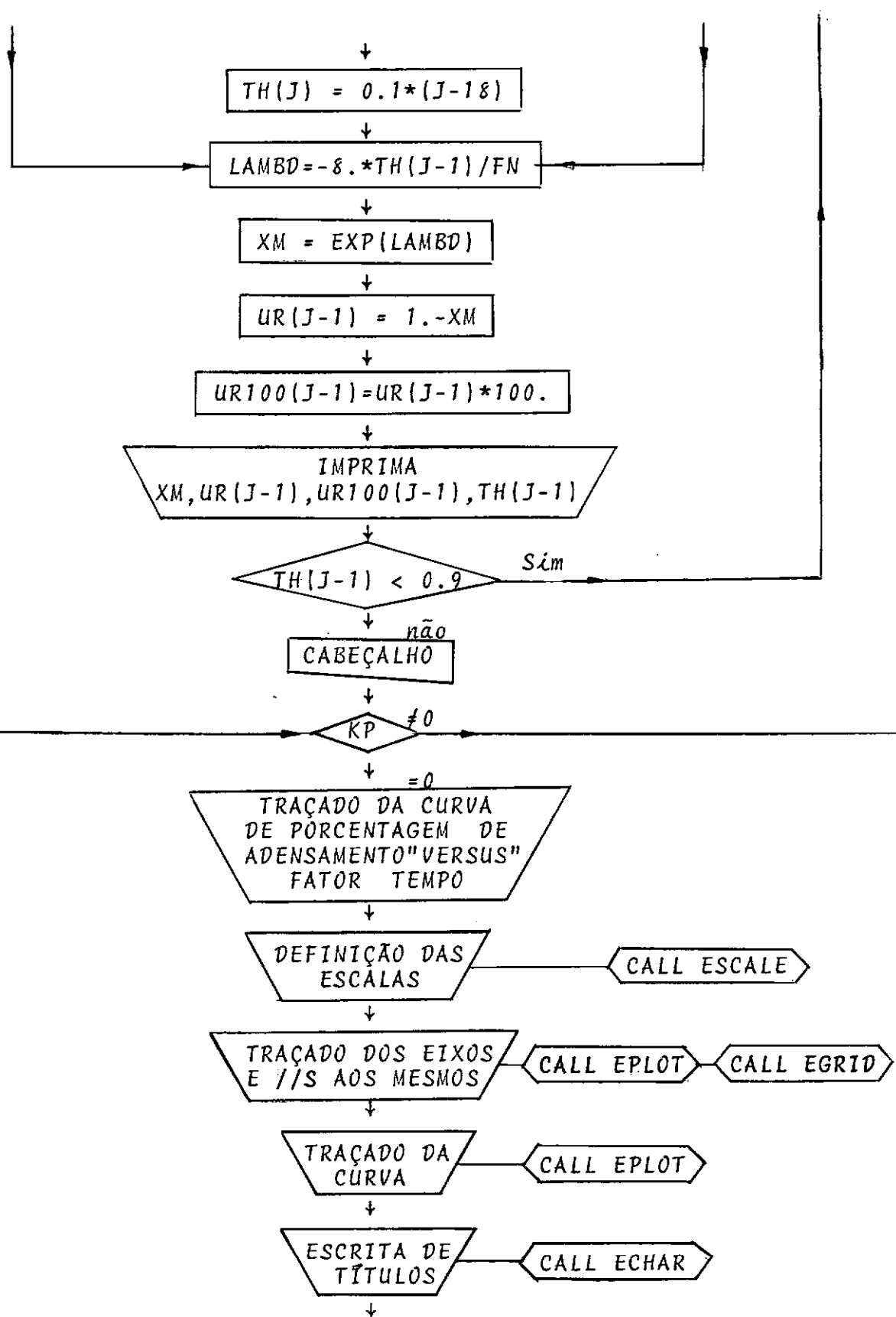


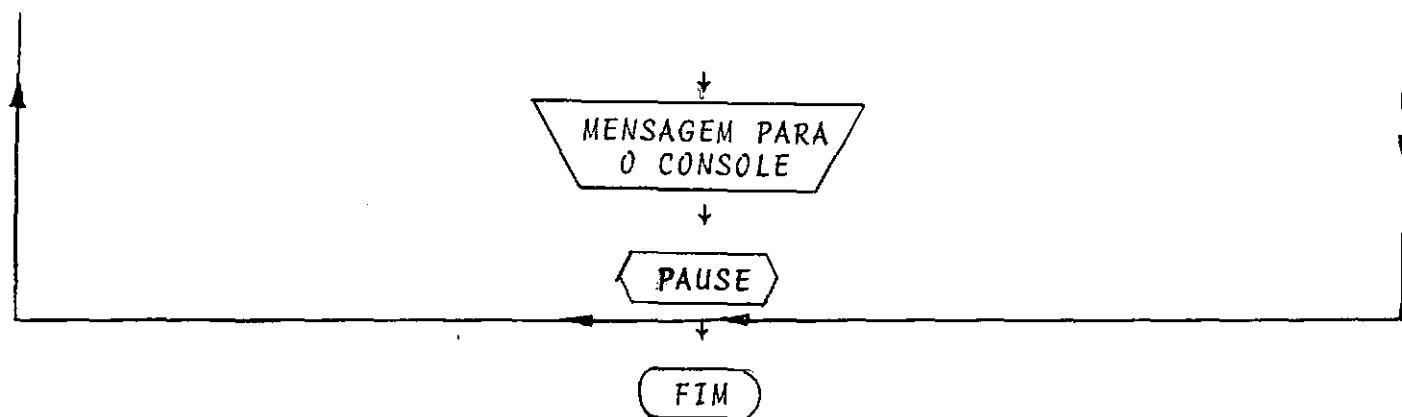
DIAGRAMA DE BLOCOS - SUBROTINA COEF
ADENSAMENTO MÉDIO











PAGE 1 A 63

// JOB T 00FF 10FF

A 63

543512

NUCLEO DE COMPUTACAO ELETRONICA DA UFRJ-1971

0000	00FF	00FF	0000
0001	10FF	10FF	0001
		0EC3	0002

V2 M09 ACTUAL 32K CONFIG 32K

// FOR DELISLE LOPES DA SILVA

*LIST SOURCE PROGRAM

*ONE WORD INTEGERS

*EXTENDED PRECISION

SUBROUTINE ZEROS

C*****

C ESTA SUBROTINA CALCULA AS RAIZES DA EQUACAO DE CONDICAQ

C $J_1(X)*Y_0(X/N)-Y_1(X)*J_0(X/N)=0$

C*****

REAL N(10)

COMMON EPSLO,NR,NN,KK,N,RAIZ(100),A(100),P(100),Q(100)

I=1

X=0.1

DELTA=0.5

IF(X-DELTA)2,2,32

32 X=X-DELTA

GO TO 2

3 X=X+DELTA

2 CALL EBESJ(X,1,BJ,1.0E-6,IER)

T=X/N(KK)

CALL EBESY(T,0,BY,IER)

P1=BJ*BY

CALL EBESY(X,1,BY,IER)

CALL EBESJ(T,0,BJ,1.0E-6,IER)

P2=BY*BJ

DIF=P1-P2

IF(DIF)6,7,3

6 X=X-DELTA

IF(DELTA-EPSLO)7,7,8

8 DELTA=0.1*DELTA

GO TO 3

7 RAIZ(I)=X

A(I)=RAIZ(I)/N(KK)

IF(I-NR)30,15,15

30 I=I+1

DELTA=0.5

9 X=X+DELTA

CALL EBESJ(X,1,BJ,1.0E-6,IER)

T=X/N(KK)

CALL EBESY(T,0,BY,IER)

P1=BJ*BY

CALL EBESY(X,1,BY,IER)

CALL EBESJ(T,0,BJ,1.0E-6,IER)

P2=BY*BJ

DIF=P1-P2

IF(DIF)9,11,12

12 X=X-DELTA

IF(DELTA-EPSLO)11,11,13

13 DELTA=0.1*DELTA

GO TO 9

PAGE 2 A 63

```

11 RAIZ(I)=X
   A(I)=RAIZ(I)/N(KK)
   IF(I-NR)14,15,15
14 I=I+1
   DELTA=0.5
   GO TO 3
15 WRITE(5,16)
16 FORMAT(15X,'RAIZES CALCULADAS PARA A EQUACAO DE CONDICAO'/15X,44('
1-'')//17X,'K',10X,'RAIZ(K)',13X,'A(K)')
   DO 17 K=1,I
   WRITE(5,18)K,RAIZ(K),A(K)
18 FORMAT(3X,I15,2F19.7)
17 CONTINUE
   RETURN
   END

```

FEATURES SUPPORTED
 ONE WORD INTEGERS
 EXTENDED PRECISION

CORE REQUIREMENTS FOR ZEROS

COMMON 1236 VARIABLES 30 PROGRAM 390

RELATIVE ENTRY POINT ADDRESS IS 005D (HEX)

END OF COMPILATION

// DUP

```

*STORE      WS  UA  ZEROS
CART ID 00FF  DB ADDR 46C2  DB CNT  001C

```

// FOR DELISLE LOPES DA SILVA

*LIST SOURCE PROGRAM

*EXTENDED PRECISION

*ONE WORD INTEGERS

SUBROUTINE COEF

C*****

C ESTA SUBROTINA CALCULA OS COEFICIENTES DA SERIE CONVERGENTE

C*****

REAL N(10)

COMMON EPSLD,NR,NN,KK,N,RAIZ(100),A(100),P(100),Q(100)

I=0

2 I=I+1

CALL EBESJ(A(I),1,BJ,1.0E-6,IER)

CALL EBESY(A(I),0,BY,IER)

P1=BJ*BY

CALL EBESY(A(I),1,BY,IER)

CALL EBESJ(A(I),0,BJ,1.0E-6,IER)

P2=BY*BJ

DIF1=P1-P2

X=A(I)*N(KK)

TERM1=4.*DIF1**2

CALL EBESJ(X,0,BJ,1.0E-6,IER)

CALL EBESY(A(I),0,BY,IER)

P3=BJ*BY

CALL EBESY(X,0,BY,IER)

CALL EBESJ(A(I),0,BJ,1.0E-6,IER)

P4=BY*BJ

1 COM N =',F5.1/15X,63('-'')////)

PAGE 4 A 63

```

C*****
C*****
C      CASO DE LIVRE DEFORMACOES
C*****
      CALL ZEROS
      CALL COEF
      WRITE(5,9)
9  FORMAT(/////15X,'VALORES FINAIS CALCULADOS'/15X,27('-'))//
      TH(1)=0.001*1
      DO 320 J=2,NTH
      XM=0.0
      IF(TH(J-1)-0.01)2,3,3
3  IF(TH(J-1)-0.1)4,5,5
2  TH(J)=0.001*J
      GO TO 6
4  TH(J)=0.01*(J-9)
      GO TO 6
5  TH(J)=0.1*(J-18)
6  I=0
7  I=I+1
      XM=XM+P(I)*EXP(Q(I)*TH(J-1))
      IF(I-NR)7,8,8
8  UR(J-1)=(1.-XM)
      UR100(J-1)=UR(J-1)*100.
      WRITE(5,11)XM,UR(J-1),UR100(J-1),TH(J-1)
11 FORMAT(9X,'XM=',F15.5,8X,'UR=',F15.5,8X,'UR X 100=',F20.5,8X,'TH='
1,F15.5)
      IF(TH(J-1)-0.9)320,50,50
320 CONTINUE
50 WRITE(5,204)KK
204 FORMAT(///15X,'FIM DO PROBLEMA NUMERO',I3/15X,25('-'))
      WRITE(5,205)
205 FORMAT(1H1/////////)
      GO TO 900
C*****
C      CASO DE DEFORMACOES IGUAIS
C*****
73 WRITE(5,74)
74 FORMAT(15X,'VALORES FINAIS CALCULADOS'/15X,27('-'))//
      FN=(N(KK)**2/(N(KK)**2-1.))*ALOG(N(KK))-((3.*N(KK)**2-1.)/(4.*N(KK)
1)**2))
      TH(1)=0.001*1
      DO 75 J=2,NTH
      IF(TH(J-1)-0.01)76,77,77
77 IF(TH(J-1)-0.1)78,79,79
76 TH(J)=0.001*J
      GO TO 80
78 TH(J)=0.01*(J-9)
      GO TO 80
79 TH(J)=0.1*(J-18)
80 LAMBD=-8.*TH(J-1)/FN
      XM=EXP(LAMBD)
      UR(J-1)=(1.-XM)
      UR100(J-1)=UR(J-1)*100.
      WRITE(5,81)XM,UR(J-1),UR100(J-1),TH(J-1)
81 FORMAT(9X,'XM=',F15.5,8X,'UR=',F15.5,8X,'UR X 100=',F20.5,8X,'TH='
1,F15.5)
      IF(TH(J-1)-0.9)75,82,82
75 CONTINUE

```

PAGE 5 A 63

```

82 WRITE(5,83)KK
83 FORMAT(///15X,'FIM DO PROBLEMA NUMERO',13/15X,25('---'))
   WRITE(5,84)
84 FORMAT(1H1/////////)
C*****
C  INICIO DA PLOTAGEM DOS
C  VALORES DE PORCENTAGEM
C  DE ADENSAMENTO VERSUS
C  FATOR TEMPO
C*****
900 IF(KP)200,60,200
60  CALL SCALE(0.05,3.375,0.,-3.)
   CALL EGRID(0,0.,-3.,10.,11)
   CALL EGRID(1,0.,-3.,1.,3)
   X(1)=0.
   NUR1=NUR+1
   DO 321 I=2,NUR1
     X(I)=X(I-1)+10.
     CALL EPLT(-2,X(I),-3.)
     CALL EGRID(1,X(I),-3.,3.,1)
321  CONTINUE
   DO 322 I=2,NTH
     Y=ALOG(TH(I))/2.3
     CALL EPLT(-2,0.,Y)
     CALL EGRID(0,0.,Y,109.44,1)
322  CONTINUE
   CALL EPLT(-2,UR100(1),-3.)
   NTH1=NTH-1
   DO 1000 I=2,NTH1
     F=UR100(I)
     Y=ALOG(TH(I))/2.3
     CALL EPLT(0,F,Y)
1000 CONTINUE
   DO 150 I=1,NUR
     CALL ECHAR(X(I),0.120,0.07,0.10,-1.57)
     WRITE(7,16)X(I)
16  FORMAT(F5.1)
150 CONTINUE
   DO 17 I=1,NTH
     Y=ALOG(TH(I))/2.3
     CALL ECHAR(-11.,Y,0.05,0.10,0.)
     WRITE(7,18)TH(I)
18  FORMAT(F7.5)
17  CONTINUE
   CALL ECHAR(25.,0.160,0.10,0.14,0.)
   WRITE(7,19)
19  FORMAT('PORCENTAGEM DE ADENSAMENTO')
   CALL ECHAR(-17.,-1.00,0.10,0.14,-1.57)
   WRITE(7,21)
21  FORMAT('FATOR TEMPO - ESCALA LOGARITMICA')
   CALL ECHAR(130.,-0.5,0.12,0.18,-1.57)
   WRITE(7,22)
22  FORMAT('CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL')
   CALL ECHAR(120.,-0.5,0.12,0.18,-1.57)
   WRITE(7,23)N(KK)
23  FORMAT('PARA A RELACAO DE DIAMETROS N =',F5.1)
41  FORMAT(1X,'MODE A PENA P/ PROXIMA PAGINA E MESMA ORIGEM')
   PAUSE 1111
200 CONTINUE

```

PAGE 6 A 63

CALL EXIT
END

UNREFERENCED STATEMENTS

41

FEATURES SUPPORTED
ONE WORD INTEGERS
EXTENDED PRECISION
IOCSCORE REQUIREMENTS FOR
COMMON 1236 VARIABLES 1238 PROGRAM 1520

END OF COMPILATION

// XEQ L
R 41 544C (HEX) WDS UNUSED BY CORE LOAD
CALL TRANSFER VECTORESQRT 25CC
EABS 25C0
ECDS 245E
ESIN 2466
POINT 2428
EBESY 20BE
EBESJ 1E84
ECHAR 1C33
EPLOT 1BF0
EGRID 188F
SCALE 1B76
EALOG 1A70
EEXP 1976
COEF 17AD
ZEROS 15E9

LIBF TRANSFER VECTOR

SUBIN 25A0
PLOTX 251E
ESUBX 1919
HOLTB 251B
ECHRX 139D
EMOVE 1D7F
ERULE 1D55
XDD 23A6
EADDX 1925
EGETP 2390
FARC 236E
XMD 232C
NORM 2302
EDIVX 1B24
PLOTI 1E22
XYPLI 1D8A
EINC 1DA6
EBCTJ 1D2F
HOLEZ 1CC0
GETAD 1CB0
IFIX 1C84
PAUSE 1C5C
EDIV 1B28

APÊNDICE II-1SOLUÇÕES DE ALGUNS PROBLEMAS

Considerações:

São apresentadas as soluções de alguns problemas para diferentes valores da relação de diâmetros n . Todas as soluções incluem ainda o traçado da curva de Porcentagem de Adensamento "versus" Fator Tempo do problema em questão. São abordadas as soluções para os casos de deformações livres e deformações iguais.

É feita ainda uma comparação entre os resultados obtidos nos dois casos (deformações livres e deformações iguais) com a relação de diâmetros $n = 5.0$.

Os problemas do caso de deformações livres foram executados alguns, com a precisão de $1.0 \text{ E-}6$, e, outros com $1.0 \text{ E-}4$. Foi utilizado um número de 15 raízes da equação de condição.

 * ADENSAMENTO COM PERCOLACAO RADIAL *

TESE DE DELISLE LOPES DA SILVA

PROBLEMA NUMERO 1 - CASO DE LIVRE DEFORMACAO COM N = 4.2

RAIZES CALCULADAS PARA A EQUACAO DE CONDICAQ

K	RAIZ(K)	A(K)
1	1.5342264	0.3652920
2	6.0045254	1.4296489
3	10.1969957	2.4278561
4	14.3512072	3.4169540
5	18.4920630	4.4028721
6	22.6266814	5.3873050
7	26.7578857	6.3709251
8	30.8870190	7.3540521
9	35.0148034	8.3368579
10	39.1416596	9.3194427
11	43.2678512	10.3018693
12	47.3935497	11.2841785
13	51.5188727	12.2663982
14	55.6439030	13.2485483
15	59.7687014	14.2306432

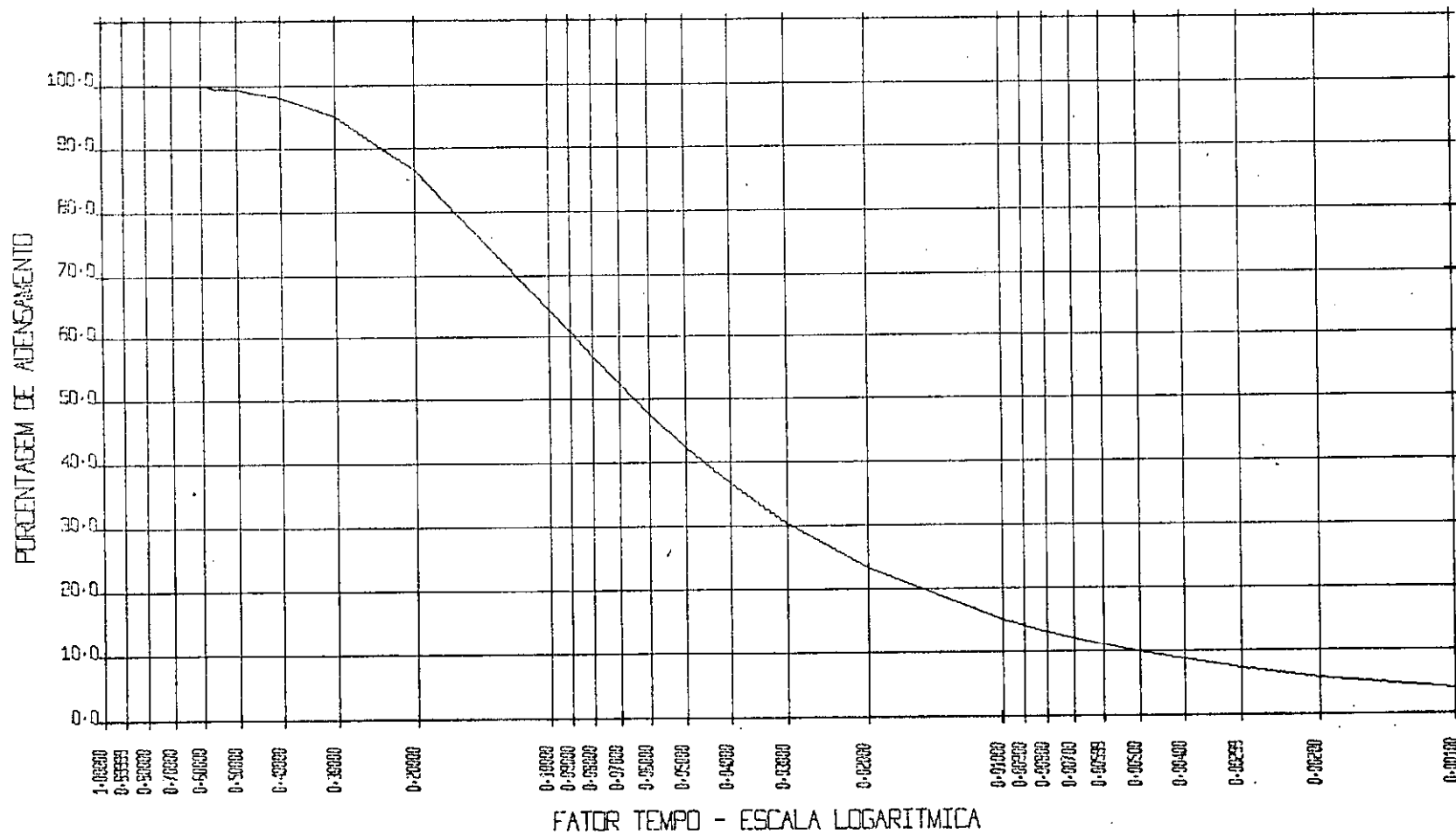
VALORES DOS COEFICIENTES DA SERIE CONVERGENTE

K	COEF.P(K)	COEF.Q(K)
1	0.9214786	-9.4154036
2	0.0393695	-144.2173025
3	0.0131049	-415.9148919
4	0.0065312	-823.8285927
5	0.0039114	-1367.8255872
6	0.0026047	-2047.8668379
7	0.0018592	-2863.9377956
8	0.0013938	-3816.0317754
9	0.0010837	-4904.1458549
10	0.0008668	-6128.2780723
11	0.0007090	-7488.4277839
12	0.0005908	-8984.5942153
13	0.0004998	-10616.7770004
14	0.0004284	-12384.9757804
15	0.0003712	-14289.1907005

XM=	0.95991	UR=	0.04008	UR X 100=	4.00837	TH=	0.00100
XM=	0.94105	UR=	0.05894	UR X 100=	5.89411	TH=	0.00200
XM=	0.92574	UR=	0.07425	UR X 100=	7.42577	TH=	0.00299
XM=	0.91227	UR=	0.08772	UR X 100=	8.77263	TH=	0.00400
XM=	0.89999	UR=	0.10000	UR X 100=	10.00057	TH=	0.00500
XM=	0.88856	UR=	0.11143	UR X 100=	11.14349	TH=	0.00599
XM=	0.87778	UR=	0.12221	UR X 100=	12.22162	TH=	0.00700
XM=	0.86751	UR=	0.13248	UR X 100=	13.24817	TH=	0.00800
XM=	0.85767	UR=	0.14232	UR X 100=	14.23236	TH=	0.00900
XM=	0.84819	UR=	0.15180	UR X 100=	15.18091	TH=	0.01000
XM=	0.76551	UR=	0.23448	UR X 100=	23.44808	TH=	0.02000
XM=	0.69524	UR=	0.30475	UR X 100=	30.47537	TH=	0.03000
XM=	0.63242	UR=	0.36757	UR X 100=	36.75773	TH=	0.04000
XM=	0.57551	UR=	0.42448	UR X 100=	42.44880	TH=	0.05000
XM=	0.52377	UR=	0.47422	UR X 100=	47.62216	TH=	0.06000
XM=	0.47670	UR=	0.52329	UR X 100=	52.32917	TH=	0.07000
XM=	0.43387	UR=	0.56612	UR X 100=	56.61285	TH=	0.08000
XM=	0.39488	UR=	0.60511	UR X 100=	60.51154	TH=	0.09000
XM=	0.35940	UR=	0.64059	UR X 100=	64.05988	TH=	0.10000
XM=	0.14017	UR=	0.85982	UR X 100=	85.98239	TH=	0.20000
XM=	0.05467	UR=	0.94532	UR X 100=	94.53276	TH=	0.30000
XM=	0.02132	UR=	0.97867	UR X 100=	97.86763	TH=	0.40000
XM=	0.00831	UR=	0.99168	UR X 100=	99.16831	TH=	0.50000
XM=	0.00324	UR=	0.99675	UR X 100=	99.67562	TH=	0.60000
XM=	0.00126	UR=	0.99873	UR X 100=	99.87348	TH=	0.70000
XM=	0.00049	UR=	0.99950	UR X 100=	99.95065	TH=	0.80000
XM=	0.00019	UR=	0.99980	UR X 100=	99.98075	TH=	0.89999

FIM DO PROBLEMA NUMERO 1

CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL
PARA AVELACAO DE DIAMETROS $N = 4.2$



RAIZES CALCULADAS PARA A EQUACAO DE CONDICAO

K	RAIZ(K)	A(K)
1	1.2484154	0.1835905
2	5.3038489	0.7799777
3	9.0659308	1.3332251
4	12.7863398	1.8803440
5	16.4914052	2.4252066
6	20.1890180	2.9689732
7	23.8824348	3.5121227
8	27.5732546	4.0548903
9	31.2623555	4.5974052
10	34.9502612	5.1397443
11	38.6373023	5.6819562
12	42.3236983	6.2240732
13	46.0095999	6.7661176
14	49.6951148	7.3081051
15	53.3803215	7.8500472

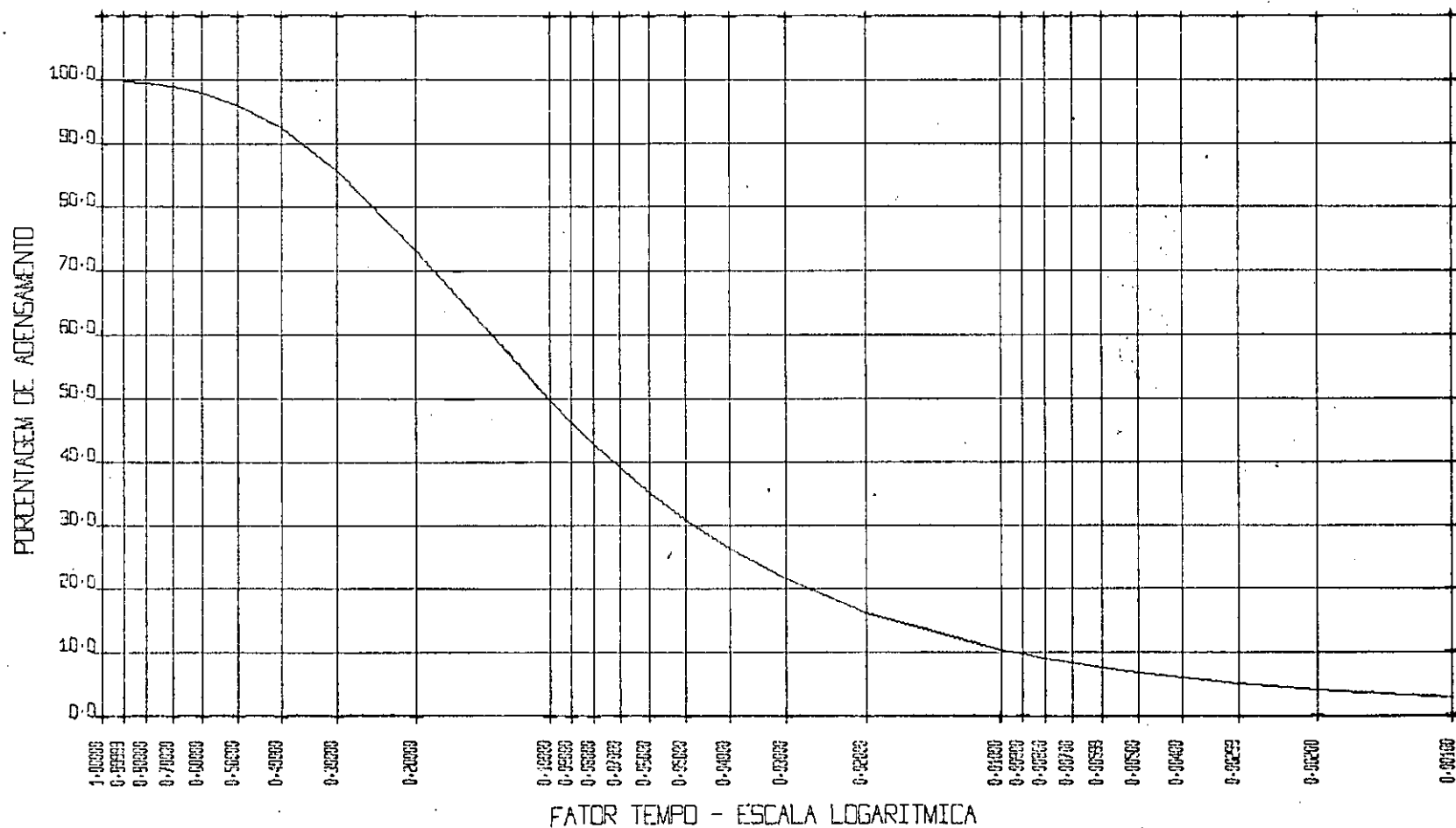
VALORES DOS COEFICIENTES DA SERIE CONVERGENTE

K	COEF.P(K)	COEF.Q(K)
1	0.9447526	-6.2341649
2	0.0285739	-112.5232549
3	0.0091075	-328.7644118
4	0.0044630	-653.9619424
5	0.0026504	-1087.8657870
6	0.0017566	-1630.3858041
7	0.0012501	-2281.4827871
8	0.0009353	-3041.1374950
9	0.0007262	-3909.3394985
10	0.0005803	-4886.0830364
11	0.0004743	-5971.3645229
12	0.0003950	-7165.1817512
13	0.0003340	-8467.5331649
14	0.0002862	-9878.4177360
15	0.0002479	-11397.8348922

XM=	0.97472	UR=	0.02527	UR X 100=	2.52793	TH=	0.00100
XM=	0.96217	UR=	0.03782	UR X 100=	3.78286	TH=	0.00200
XM=	0.95177	UR=	0.04822	UR X 100=	4.82246	TH=	0.00299
XM=	0.94251	UR=	0.05748	UR X 100=	5.74890	TH=	0.00400
XM=	0.93397	UR=	0.06602	UR X 100=	6.60211	TH=	0.00500
XM=	0.92597	UR=	0.07402	UR X 100=	7.40274	TH=	0.00599
XM=	0.91836	UR=	0.08163	UR X 100=	8.16313	TH=	0.00700
XM=	0.91108	UR=	0.08891	UR X 100=	8.89138	TH=	0.00800
XM=	0.90406	UR=	0.09593	UR X 100=	9.59313	TH=	0.00900
XM=	0.89727	UR=	0.10272	UR X 100=	10.27254	TH=	0.01000
XM=	0.83702	UR=	0.16297	UR X 100=	16.29716	TH=	0.02000
XM=	0.78457	UR=	0.21542	UR X 100=	21.54228	TH=	0.03000
XM=	0.73655	UR=	0.26344	UR X 100=	26.34425	TH=	0.04000
XM=	0.69184	UR=	0.30815	UR X 100=	30.81537	TH=	0.05000
XM=	0.64996	UR=	0.35003	UR X 100=	35.00310	TH=	0.06000
XM=	0.61066	UR=	0.38933	UR X 100=	38.93344	TH=	0.07000
XM=	0.57375	UR=	0.42624	UR X 100=	42.62486	TH=	0.08000
XM=	0.53907	UR=	0.46092	UR X 100=	46.09273	TH=	0.09000
XM=	0.50649	UR=	0.49350	UR X 100=	49.35085	TH=	0.10000
XM=	0.27153	UR=	0.72846	UR X 100=	72.84652	TH=	0.20000
XM=	0.14557	UR=	0.85442	UR X 100=	85.44275	TH=	0.30000
XM=	0.07804	UR=	0.92195	UR X 100=	92.19572	TH=	0.40000
XM=	0.04183	UR=	0.95816	UR X 100=	95.81605	TH=	0.50000
XM=	0.02243	UR=	0.97756	UR X 100=	97.75694	TH=	0.60000
XM=	0.01202	UR=	0.98797	UR X 100=	98.79747	TH=	0.70000
XM=	0.00644	UR=	0.99355	UR X 100=	99.35531	TH=	0.80000
XM=	0.00345	UR=	0.99654	UR X 100=	99.65437	TH=	0.89999

FIM DO PROBLEMA NUMERO 2

CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL
PARA ARELACAO DE DIAMETROS $N = 6.8$



PROBLEMA NUMERO 3 - CASO DE LIVRE DEFORMACAO COM N = 5.0

RAIZES CALCULADAS PARA A EQUACAO DE CONDICAO

K	RAIZ(K)	A(K)
1	1.4117909	0.2823591
2	5.6960744	1.1392148
3	9.6759122	1.9391824
4	13.6560321	2.7312064
5	17.6020229	3.5204045
6	21.5413283	4.3082656
7	25.4769432	5.0953886
8	29.4103055	5.8820611
9	33.3421943	6.6684388
10	37.2730667	7.4546133
11	41.2032082	8.2406416
12	45.1328071	9.0265614
13	49.0619921	9.8123984
14	52.9908546	10.5981709
15	56.9194607	11.3838921

VALORES DOS COEFICIENTES DA SERIE CONVERGENTE

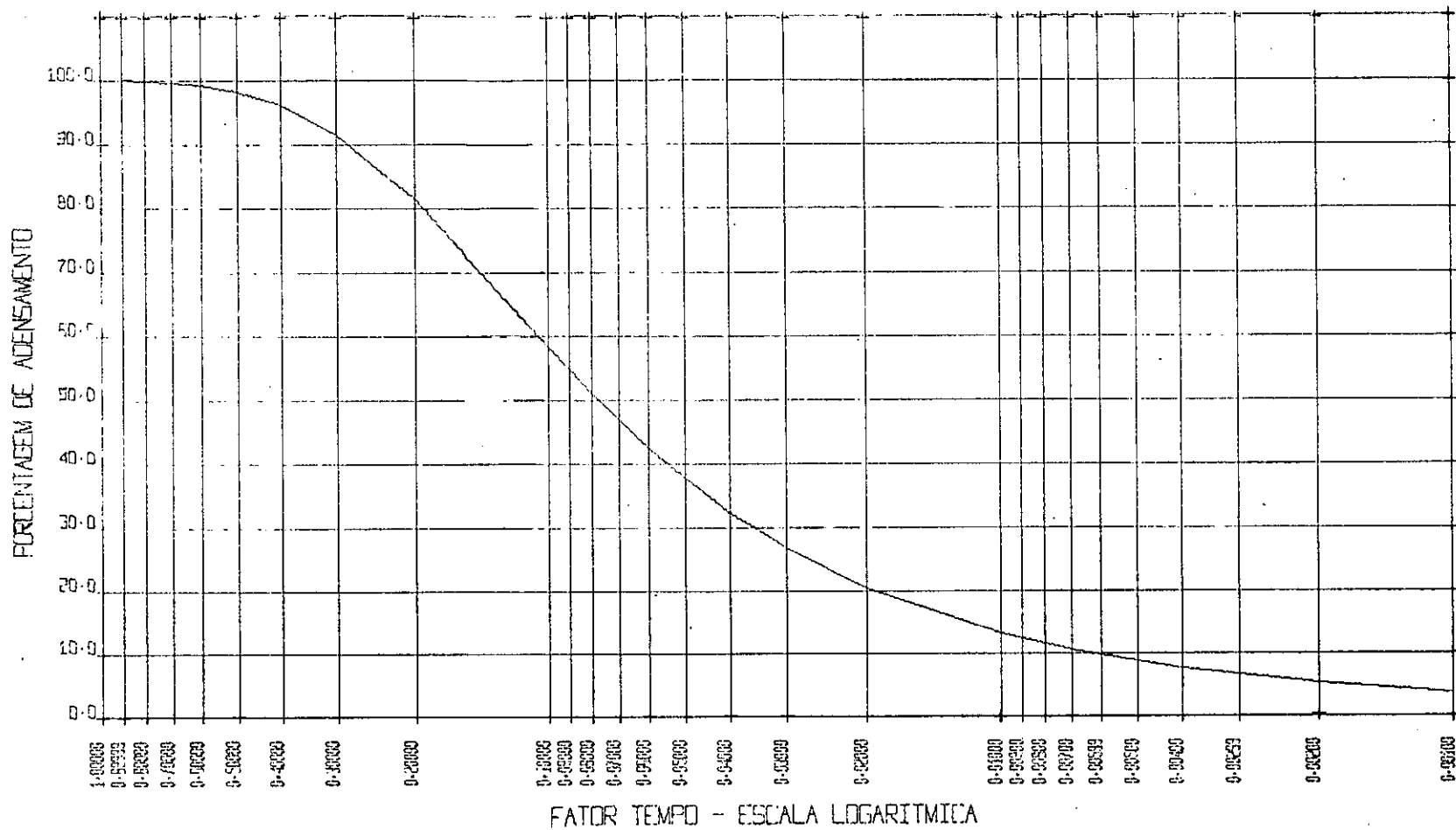
K	COEF.P(K)	COEF.Q(K)
1	0.9307901	-7.9726151
2	0.0350608	-129.7810553
3	0.0115011	-376.0428574
4	0.0057013	-745.9488618
5	0.0034056	-1239.3248529
6	0.0022647	-1856.1153025
7	0.0016151	-2596.2985410
8	0.0012101	-3459.8642835
9	0.0009405	-4446.8076820
10	0.0007520	-5557.1260185
11	0.0006151	-6790.8174724
12	0.0005124	-8147.8810997
13	0.0004335	-9628.3162918
14	0.0003715	-11232.4226730
15	0.0003219	-12959.3000411

XM=	0.96630	UR=	0.03369	UR X 100=	3.36938	TH=	0.00100
XM=	0.95016	UR=	0.04983	UR X 100=	4.98330	TH=	0.00200
XM=	0.93696	UR=	0.06303	UR X 100=	6.30318	TH=	0.00299
XM=	0.92530	UR=	0.07469	UR X 100=	7.46927	TH=	0.00400
XM=	0.91463	UR=	0.08536	UR X 100=	8.53622	TH=	0.00500
XM=	0.90467	UR=	0.09532	UR X 100=	9.53218	TH=	0.00599
XM=	0.89526	UR=	0.10473	UR X 100=	10.47398	TH=	0.00700
XM=	0.88627	UR=	0.11372	UR X 100=	11.37261	TH=	0.00800
XM=	0.87764	UR=	0.12235	UR X 100=	12.23574	TH=	0.00900
XM=	0.86931	UR=	0.13068	UR X 100=	13.06899	TH=	0.01000
XM=	0.79622	UR=	0.20377	UR X 100=	20.37766	TH=	0.02000
XM=	0.73350	UR=	0.26649	UR X 100=	26.64982	TH=	0.03000
XM=	0.67682	UR=	0.32317	UR X 100=	32.31717	TH=	0.04000
XM=	0.62483	UR=	0.37516	UR X 100=	37.51645	TH=	0.05000
XM=	0.57691	UR=	0.42308	UR X 100=	42.30808	TH=	0.06000
XM=	0.53269	UR=	0.46730	UR X 100=	46.73000	TH=	0.07000
XM=	0.49187	UR=	0.50812	UR X 100=	50.81239	TH=	0.08000
XM=	0.45418	UR=	0.54581	UR X 100=	54.58174	TH=	0.09000
XM=	0.41937	UR=	0.58062	UR X 100=	58.06220	TH=	0.10000
XM=	0.18895	UR=	0.81104	UR X 100=	81.10446	TH=	0.20000
XM=	0.08513	UR=	0.91486	UR X 100=	91.48640	TH=	0.30000
XM=	0.03835	UR=	0.96164	UR X 100=	96.16410	TH=	0.40000
XM=	0.01728	UR=	0.98271	UR X 100=	98.27169	TH=	0.50000
XM=	0.00778	UR=	0.99221	UR X 100=	99.22129	TH=	0.60000
XM=	0.00350	UR=	0.99649	UR X 100=	99.64914	TH=	0.70000
XM=	0.00158	UR=	0.99841	UR X 100=	99.84191	TH=	0.80000
XM=	0.00071	UR=	0.99928	UR X 100=	99.92877	TH=	0.89999

FIM DO PROBLEMA NUMERO 3

CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL

PARA A RELACAO DE DIAMETROS $N = 5.0$



RAIZES CALCULADAS PARA A EQUAÇÃO DE CONDICAÇÃO

K	RAIZ(K)	A(K)
1	0.8594999	0.0286479
2	4.5099499	0.1503316
3	7.8501199	0.2616733
4	11.1492498	0.3716416
5	14.4317997	0.4810599
6	17.7055496	0.5901849
7	20.9737995	0.6991266
8	24.2383994	0.8079466
9	27.5003493	0.9166783
10	30.7602991	1.0253433
11	34.0187990	1.1339599
12	37.2760988	1.2425366
13	40.5324485	1.3510816
14	43.7879984	1.4595999
15	47.0428981	1.5680966

VALORES DOS COEFICIENTES DA SERIE CONVERGENTE

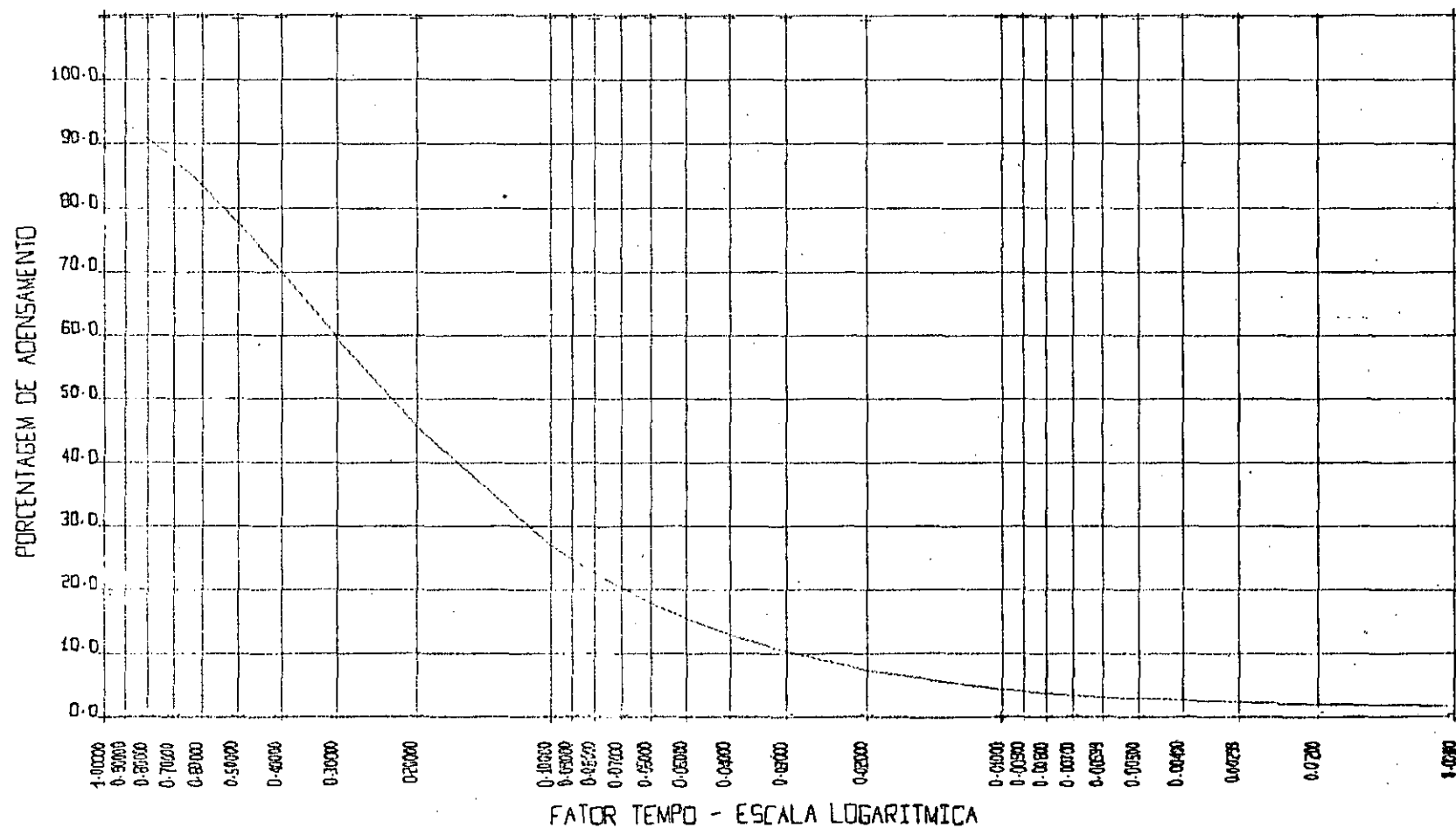
K	COEF. P(K)	COEF. Q(K)
1	0.9803929	-2.9549609
2	0.0115148	-81.3585947
3	0.0031260	-246.5025550
4	0.0014098	-497.2230852
5	0.0007951	-833.1073729
6	0.0005087	-1253.9459466
7	0.0003530	-1759.6010618
8	0.0002591	-2350.0000286
9	0.0001983	-3025.0768527
10	0.0001566	-3784.7840185
11	0.0001268	-4629.1147594
12	0.0001048	-5558.0301704
13	0.0000881	-6571.5175361
14	0.0000751	-7669.5552253
15	0.0000647	-8852.1370506

XM=	0.99200	UR=	0.00799	UR X 100=	0.79927	TH=	0.00100
XM=	0.98703	UR=	0.01296	UR X 100=	1.29623	TH=	0.00200
XM=	0.98264	UR=	0.01735	UR X 100=	1.73500	TH=	0.00299
XM=	0.97858	UR=	0.02141	UR X 100=	2.14194	TH=	0.00400
XM=	0.97472	UR=	0.02527	UR X 100=	2.52771	TH=	0.00500
XM=	0.97102	UR=	0.02897	UR X 100=	2.89793	TH=	0.00599
XM=	0.96743	UR=	0.03256	UR X 100=	3.25602	TH=	0.00700
XM=	0.96395	UR=	0.03604	UR X 100=	3.60428	TH=	0.00800
XM=	0.96055	UR=	0.03944	UR X 100=	3.94433	TH=	0.00900
XM=	0.95722	UR=	0.04277	UR X 100=	4.27736	TH=	0.01000
XM=	0.92641	UR=	0.07358	UR X 100=	7.35835	TH=	0.02000
XM=	0.89822	UR=	0.10177	UR X 100=	10.17720	TH=	0.03000
XM=	0.87154	UR=	0.12845	UR X 100=	12.84568	TH=	0.04000
XM=	0.84593	UR=	0.15406	UR X 100=	15.40685	TH=	0.05000
XM=	0.82119	UR=	0.17880	UR X 100=	17.88037	TH=	0.06000
XM=	0.79723	UR=	0.20276	UR X 100=	20.27608	TH=	0.07000
XM=	0.77400	UR=	0.22599	UR X 100=	22.59947	TH=	0.08000
XM=	0.75145	UR=	0.24854	UR X 100=	24.85406	TH=	0.09000
XM=	0.72957	UR=	0.27042	UR X 100=	27.04251	TH=	0.10000
XM=	0.54291	UR=	0.45708	UR X 100=	45.70804	TH=	0.20000
XM=	0.40402	UR=	0.59597	UR X 100=	59.59796	TH=	0.30000
XM=	0.30065	UR=	0.69934	UR X 100=	69.93433	TH=	0.40000
XM=	0.22373	UR=	0.77626	UR X 100=	77.62626	TH=	0.50000
XM=	0.16649	UR=	0.83350	UR X 100=	83.35030	TH=	0.60000
XM=	0.12390	UR=	0.87609	UR X 100=	87.60992	TH=	0.70000
XM=	0.09220	UR=	0.90779	UR X 100=	90.77977	TH=	0.80000
XM=	0.06861	UR=	0.93138	UR X 100=	93.13865	TH=	0.89999

FIM DO PROBLEMA NUMERO 5

CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL

PARA A RELACAO DE DIAMETROS $N = 30.0$



 * ADENSAMENTO COM PERCOLACAO RADIAL *

TESE DE DELISLE LOPES DA SILVA

PROBLEMA NUMERO 1 - CASO DE DEFORMACOES IGUAIS COM N = 4.2

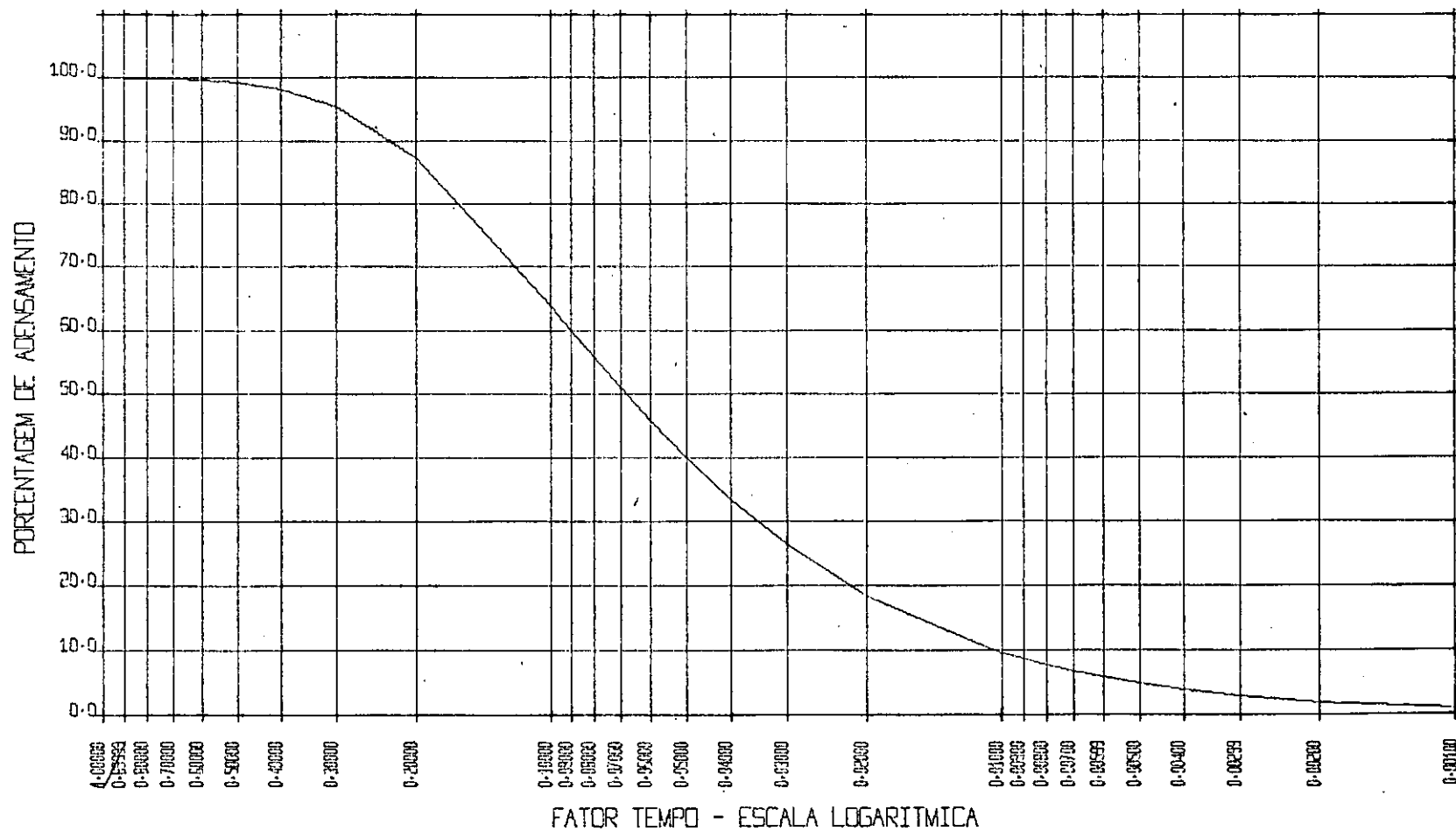
VALORES FINAIS CALCULADOS

XM=	0.98986	UR=	0.01013	UR X 100=	1.01329	TH=	0.00100
XM=	0.97983	UR=	0.02016	UR X 100=	2.01631	TH=	0.00200
XM=	0.96990	UR=	0.03009	UR X 100=	3.00917	TH=	0.00299
XM=	0.96008	UR=	0.03991	UR X 100=	3.99197	TH=	0.00400
XM=	0.95035	UR=	0.04964	UR X 100=	4.96481	TH=	0.00500
XM=	0.94072	UR=	0.05927	UR X 100=	5.92779	TH=	0.00599
XM=	0.93118	UR=	0.06881	UR X 100=	6.88102	TH=	0.00700
XM=	0.92175	UR=	0.07824	UR X 100=	7.82458	TH=	0.00800
XM=	0.91241	UR=	0.08758	UR X 100=	8.75859	TH=	0.00900
XM=	0.90316	UR=	0.09683	UR X 100=	9.68313	TH=	0.01000
XM=	0.81571	UR=	0.18428	UR X 100=	18.42863	TH=	0.02000
XM=	0.73672	UR=	0.26327	UR X 100=	26.32730	TH=	0.03000
XM=	0.66538	UR=	0.33461	UR X 100=	33.46112	TH=	0.04000
XM=	0.60095	UR=	0.39904	UR X 100=	39.90417	TH=	0.05000
XM=	0.54276	UR=	0.45723	UR X 100=	45.72333	TH=	0.06000
XM=	0.49020	UR=	0.50979	UR X 100=	50.97901	TH=	0.07000
XM=	0.44274	UR=	0.55725	UR X 100=	55.72578	TH=	0.08000
XM=	0.39987	UR=	0.60012	UR X 100=	60.01291	TH=	0.09000
XM=	0.36115	UR=	0.63884	UR X 100=	63.88492	TH=	0.10000
XM=	0.13042	UR=	0.86457	UR X 100=	86.95701	TH=	0.20000
XM=	0.04710	UR=	0.95289	UR X 100=	95.28951	TH=	0.30000
XM=	0.01701	UR=	0.98298	UR X 100=	98.29880	TH=	0.40000
XM=	0.00614	UR=	0.99385	UR X 100=	99.38561	TH=	0.50000
XM=	0.00221	UR=	0.99778	UR X 100=	99.77811	TH=	0.60000
XM=	0.00080	UR=	0.99919	UR X 100=	99.91986	TH=	0.70000
XM=	0.00028	UR=	0.99971	UR X 100=	99.97105	TH=	0.80000
XM=	0.00010	UR=	0.99989	UR X 100=	99.98954	TH=	0.89999

FIM DO PROBLEMA NUMERO 1

CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL

PARA A RELACAO DE DIAMETROS $N = 4.2$



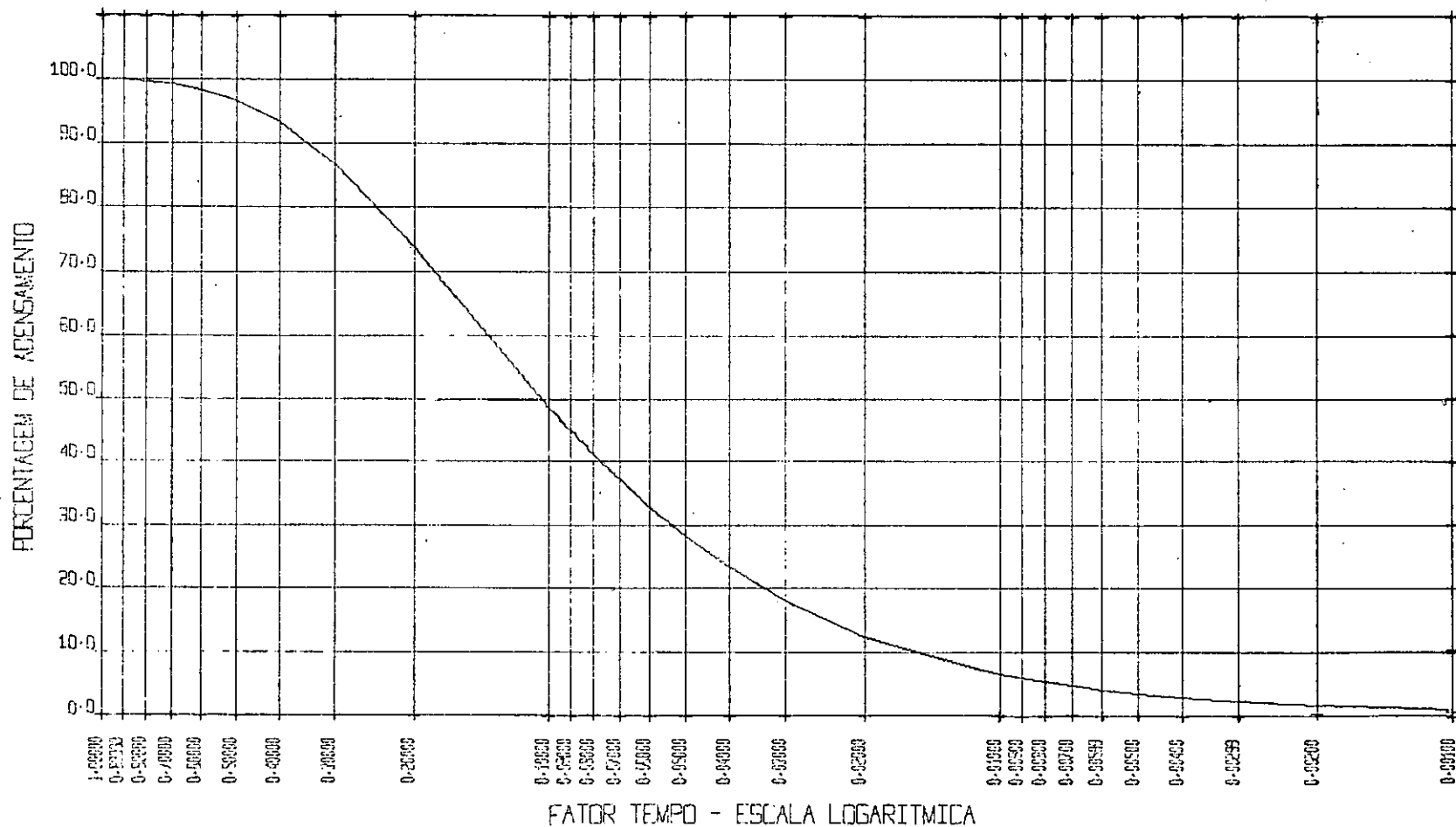
PROBLEMA NUMERO 2 - CASO DE DEFORMACOES IGUAIS COM N = 6.8

VALORES FINAIS CALCULADOS

XP=	0.99343	UR=	0.00656	UR X 100=	0.65643	TH=	0.00100
XP=	0.98601	UR=	0.01308	UR X 100=	1.30855	TH=	0.00200
XP=	0.97043	UR=	0.01956	UR X 100=	1.95640	TH=	0.00299
XP=	0.97400	UR=	0.02599	UR X 100=	2.59999	TH=	0.00400
XP=	0.96760	UR=	0.03239	UR X 100=	3.23936	TH=	0.00500
XP=	0.96125	UR=	0.03874	UR X 100=	3.87453	TH=	0.00600
XP=	0.95494	UR=	0.04505	UR X 100=	4.50553	TH=	0.00700
XP=	0.94867	UR=	0.05132	UR X 100=	5.13238	TH=	0.00800
XP=	0.94244	UR=	0.05755	UR X 100=	5.75513	TH=	0.00900
XP=	0.93626	UR=	0.06373	UR X 100=	6.37378	TH=	0.01000
XP=	0.93008	UR=	0.12341	UR X 100=	12.34132	TH=	0.02000
XP=	0.92071	UR=	0.17928	UR X 100=	17.92850	TH=	0.03000
XP=	0.91840	UR=	0.23159	UR X 100=	23.15946	TH=	0.04000
XP=	0.91942	UR=	0.28057	UR X 100=	28.05721	TH=	0.05000
XP=	0.91357	UR=	0.32642	UR X 100=	32.64269	TH=	0.06000
XP=	0.91064	UR=	0.36735	UR X 100=	36.93590	TH=	0.07000
XP=	0.91044	UR=	0.40955	UR X 100=	40.95547	TH=	0.08000
XP=	0.91281	UR=	0.44718	UR X 100=	44.71885	TH=	0.09000
XP=	0.91757	UR=	0.48242	UR X 100=	48.24235	TH=	0.10000
XP=	0.92678	UR=	0.73211	UR X 100=	73.21146	TH=	0.20000
XP=	0.13865	UR=	0.86134	UR X 100=	86.13488	TH=	0.30000
XP=	0.07176	UR=	0.92823	UR X 100=	92.82374	TH=	0.40000
XP=	0.03714	UR=	0.96285	UR X 100=	96.28573	TH=	0.50000
XP=	0.01922	UR=	0.98077	UR X 100=	98.07758	TH=	0.60000
XP=	0.00994	UR=	0.99005	UR X 100=	99.00500	TH=	0.70000
XP=	0.00514	UR=	0.99485	UR X 100=	99.48501	TH=	0.80000
XP=	0.00266	UR=	0.99733	UR X 100=	99.73345	TH=	0.89999

FIN DO PROBLEMA NUMERO 2

CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL
PARA A RELACAO DE DIAMETROS $N = 6.8$

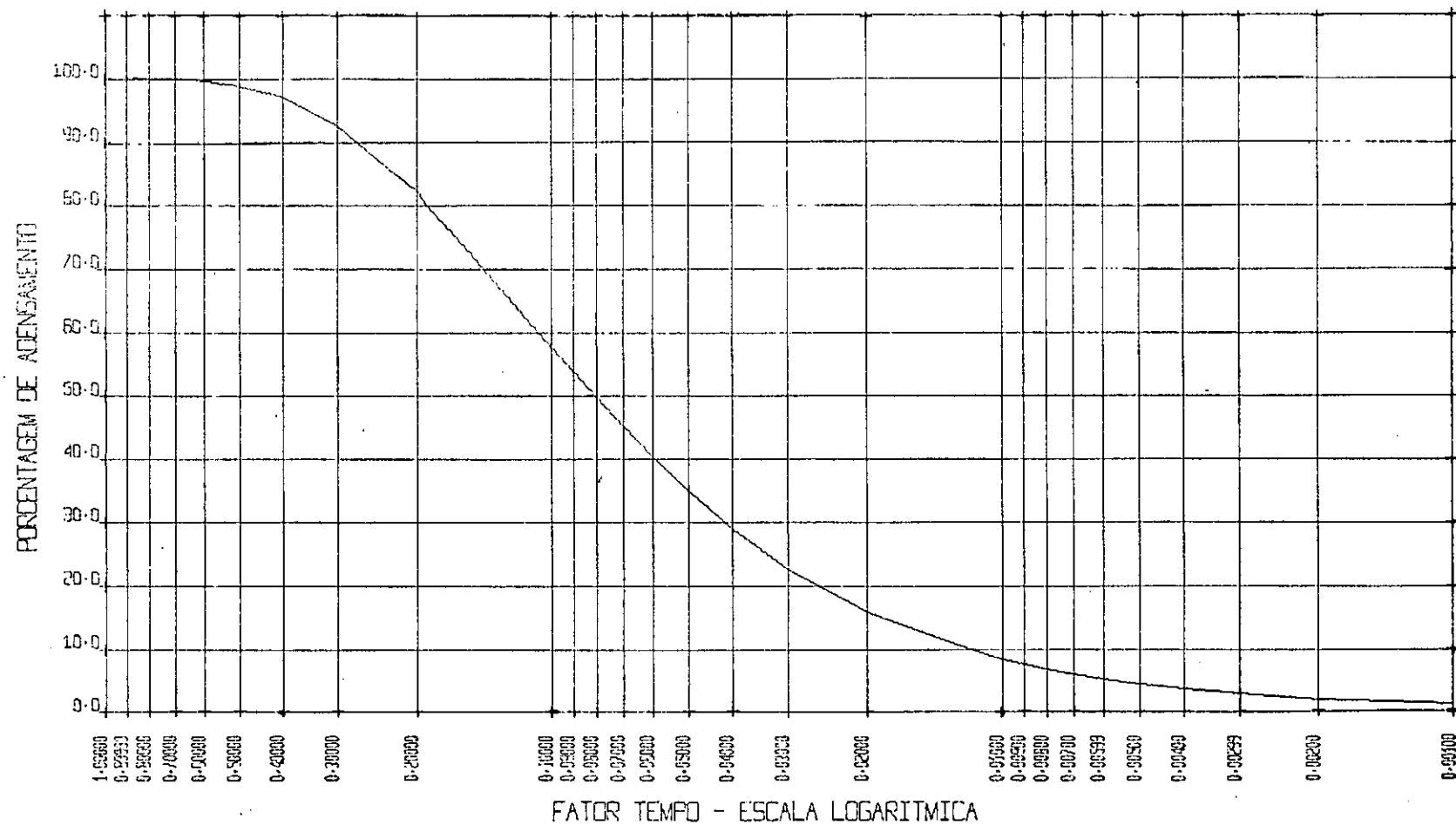


VALORES FINAIS CALCULADOS

XM=	0.99149	UR=	0.00850	UR X 100=	0.85060	TH=	0.00100
XM=	0.98306	UR=	0.01693	UR X 100=	1.69398	TH=	0.00200
XM=	0.97469	UR=	0.02530	UR X 100=	2.53018	TH=	0.00299
XM=	0.96640	UR=	0.03359	UR X 100=	3.35926	TH=	0.00400
XM=	0.95818	UR=	0.04181	UR X 100=	4.18130	TH=	0.00500
XM=	0.95003	UR=	0.04996	UR X 100=	4.99634	TH=	0.00599
XM=	0.94195	UR=	0.05804	UR X 100=	5.80445	TH=	0.00700
XM=	0.93394	UR=	0.06605	UR X 100=	6.60568	TH=	0.00800
XM=	0.92599	UR=	0.07400	UR X 100=	7.40010	TH=	0.00900
XM=	0.91812	UR=	0.08187	UR X 100=	8.18776	TH=	0.01000
XM=	0.91029	UR=	0.15705	UR X 100=	15.70514	TH=	0.02000
XM=	0.77392	UR=	0.22607	UR X 100=	22.60700	TH=	0.03000
XM=	0.71056	UR=	0.28343	UR X 100=	28.94376	TH=	0.04000
XM=	0.65238	UR=	0.34761	UR X 100=	34.76168	TH=	0.05000
XM=	0.59896	UR=	0.40103	UR X 100=	40.10324	TH=	0.06000
XM=	0.54992	UR=	0.45207	UR X 100=	45.00745	TH=	0.07000
XM=	0.50489	UR=	0.49510	UR X 100=	49.51011	TH=	0.08000
XM=	0.46355	UR=	0.53644	UR X 100=	53.64411	TH=	0.09000
XM=	0.42560	UR=	0.57439	UR X 100=	57.43962	TH=	0.10000
XM=	0.18113	UR=	0.81886	UR X 100=	81.88614	TH=	0.20000
XM=	0.07709	UR=	0.92290	UR X 100=	92.29067	TH=	0.30000
XM=	0.03281	UR=	0.96718	UR X 100=	96.71888	TH=	0.40000
XM=	0.01396	UR=	0.98603	UR X 100=	98.60354	TH=	0.50000
XM=	0.00594	UR=	0.99405	UR X 100=	99.40566	TH=	0.60000
XM=	0.00252	UR=	0.99747	UR X 100=	99.74704	TH=	0.70000
XM=	0.00107	UR=	0.99892	UR X 100=	99.89234	TH=	0.80000
XM=	0.00045	UR=	0.99954	UR X 100=	99.95418	TH=	0.89999

CURVA TEORICA DE ADENSAMENTO RADIAL

PARA A RELACAO DE DIAMETROS $N = 5.0$



VALORES DAS PORCENTAGENS DE ADENSAMENTO OBTIDAS PARA OS
CASOS DE DEFORMAÇÕES IGUAIS E DEFORMAÇÕES LIVRES
RELAÇÃO DE DIÂMETROS $n = 5.0$

TH	UR% (Deformações Livres)	UR% (Deformações Iguais)
0.001	3.36938	0.85060
0.002	4.98330	1.69398
0.003	6.30318	2.53018
0.004	7.46927	3.35926
0.005	8.53622	4.18130
0.006	9.53218	4.99634
0.007	10.47398	5.80445
0.008	11.37261	6.60568
0.009	12.23574	7.40010
0.01	13.06899	8.18776
0.02	20.37766	15.70514
0.03	26.64982	22.60700
0.04	32.31717	28.94376
0.05	37.51645	34.76168
0.06	42.30808	40.10324
0.07	46.73000	45.00743
0.08	50.81239	49.51011
0.09	54.58174	53.64411
0.1	58.06220	57.43962
0.2	81.10446	81.88614
0.3	91.48640	92.29067
0.4	96.16410	96.71888
0.5	98.27169	98.60354
0.6	99.22129	99.40566
0.7	99.64914	99.74704
0.8	99.84191	99.89234
0.9	99.92877	99.95418

Um exame dos resultados. vem comprovar a afirmação de RICHART⁹, o qual cita que para um valor de $n=5.0$, a discrepância entre os resultados é acentuada para o início do adensamento, tornando-se cada vez menor a partir de mais ou menos 50% da consolidação.

APÊNDICE II-2

EXTENSÃO DO PROGRAMA

Em vista do interesse na determinação de um valor do coeficiente de permeabilidade horizontal, que seja válido para todos os pontos do solo, sômente foram usados os valores médios das pressões neutras durante o processo de adensamento. No entanto, seria também muito importante que se fizesse pelo menos uma referência à maneira de avaliação do progresso do adensamento em um ponto no interior da zona de influência do dreno. O valor da sobrepressão hidrostática em um dado instante para um ponto qualquer da zona de influência (caso de deformações livres) é dado por:

$$u_h = u_0 \sum_{a_1, a_2, a_3 \dots}^{a = \infty} \frac{-4a^2 n^2 T_h}{a} e^{-\frac{2a^2 T_h}{a}} \times$$

$$\times \frac{[J_1(a) \cdot y_0(a) - y_1(a) \cdot J_0(a)] [J_0(\frac{ar}{\kappa_w}) \cdot y_0(a) - y_0(\frac{ar}{\kappa_w}) \cdot J_0(a)]}{\left\{ n^2 [J_0(an) \cdot y_0(a) - y_0(an) \cdot J_0(a)]^2 - [J_1(a) \cdot y_0(a) - y_1(a) \cdot J_0(a)]^2 \right\}}$$

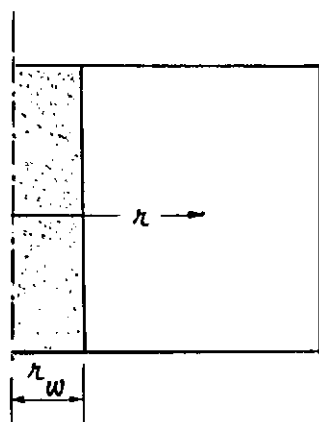
onde $a_1, a_2, a_3 \dots$ são raízes da equação de condição

$$J_1(an).y_0(a) - y_1(an).J_0(a) = 0 .$$

Comparando-se esta solução com a apresentada para o valor do excesso de poro-pressão médio, nota-se que as duas são muito semelhantes, sendo inclusive a equação de condição uma só para ambos os casos. Praticamente, a diferença fundamental reside na inclusão das funções

$$J_0\left(\frac{ar}{r_w}\right) \quad \text{e} \quad y_0\left(\frac{ar}{r_w}\right) ,$$

sendo r_w o valor do raio do dreno em questão, e r o valor da distância radial do ponto considerado ao eixo do dreno. As demais diferenças existentes são apenas quanto ao arranjo de grandezas comuns a ambas as fórmulas.



Partindo-se desta análise, pode-se prever que a mesma programação automática para o caso do adensamento médio da camada, pode ser utilizada com poucas alterações na previsão do adensamento em um ponto.

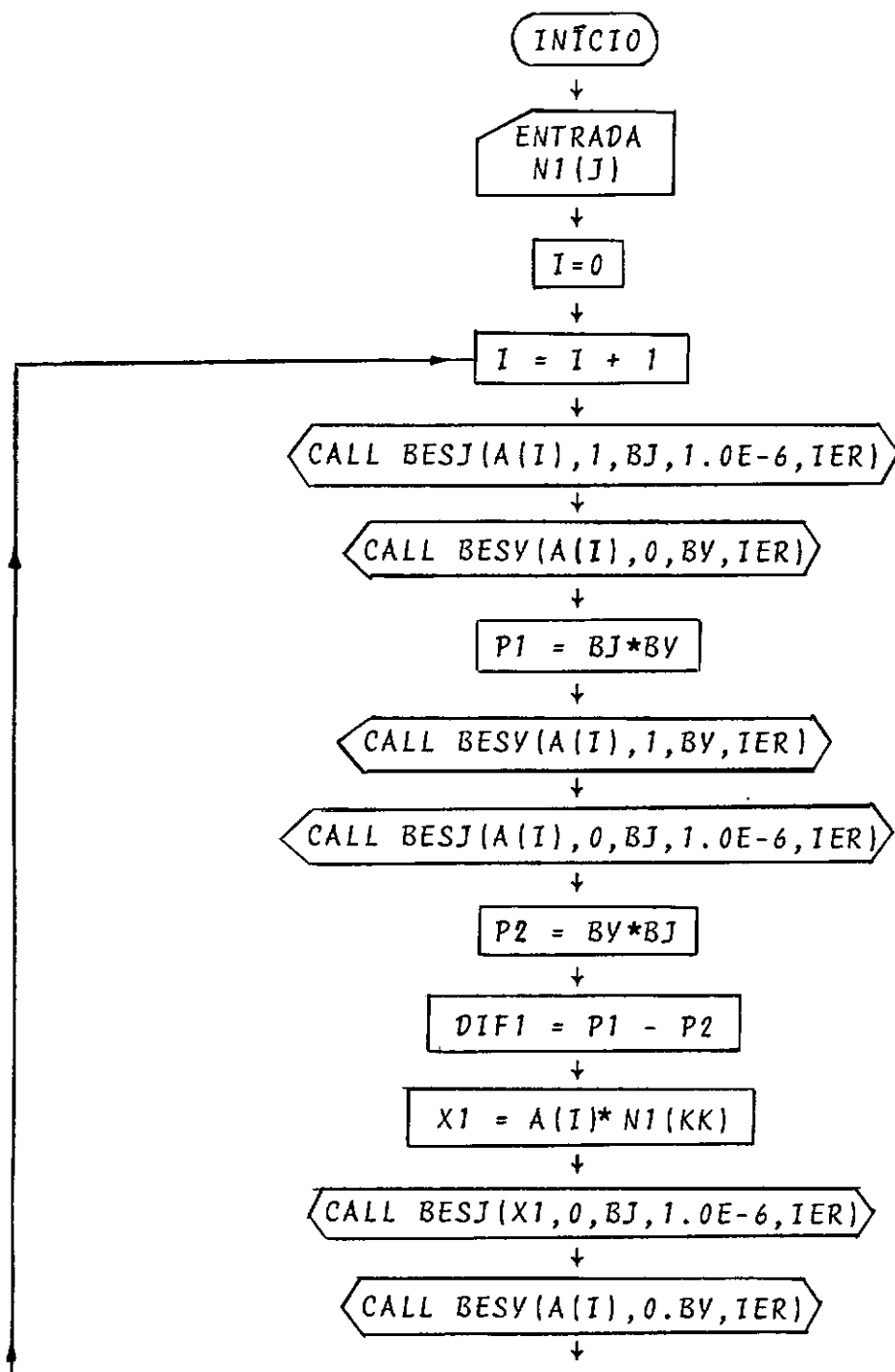
Lógicamente, a subrotina Zeros que calcula as raízes da equação de condição permanecerá inalterada para ambos os casos.

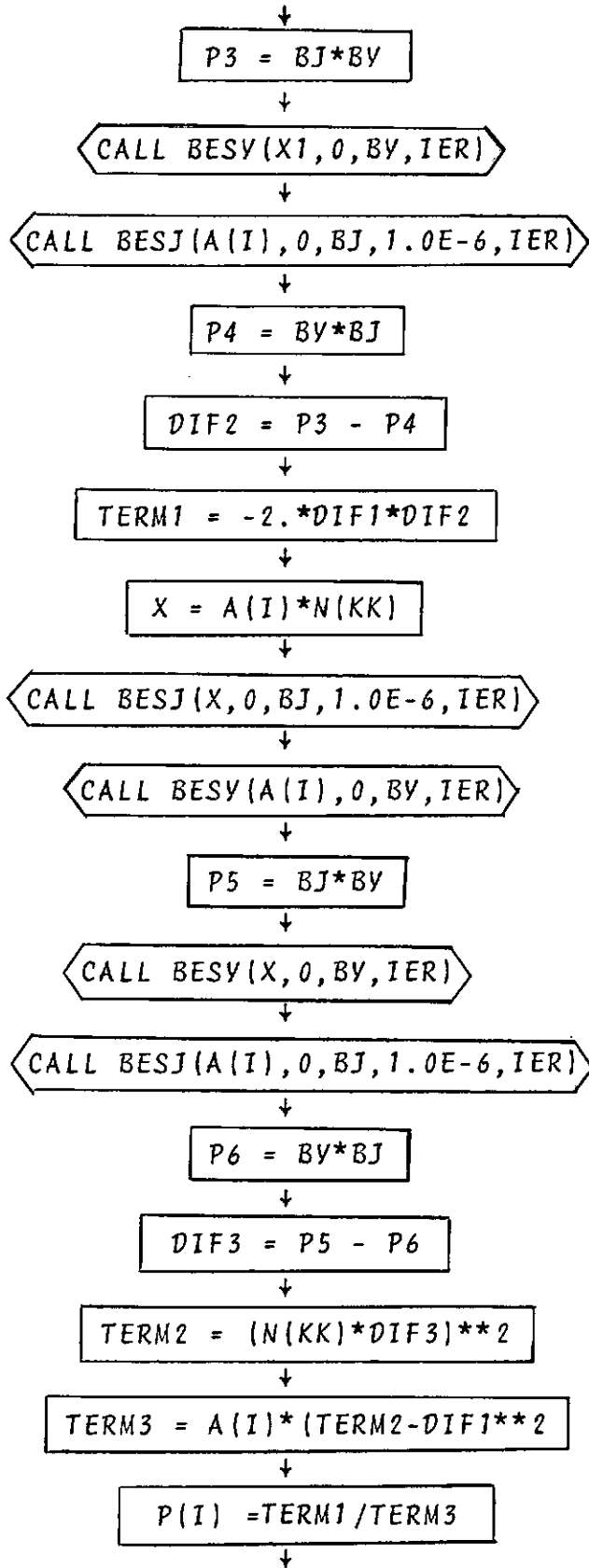
Apenas a subrotina Coef sofrerá algumas modificações, a fim de adaptar-se à nova fórmula. Inicialmente, deverão ser introduzidas nesta subrotina, as duas novas variáveis r_w (raio do dreno) e r (distância radial) ou, o que se torna mais simples, introduzir logo a relação radial $r/r_w = N1$, tal como foi feito no caso da relação de diâmetros $\frac{D}{d} = N$. Feito isto, a marcha de cálculo voltará a ser semelhante a do caso anterior.

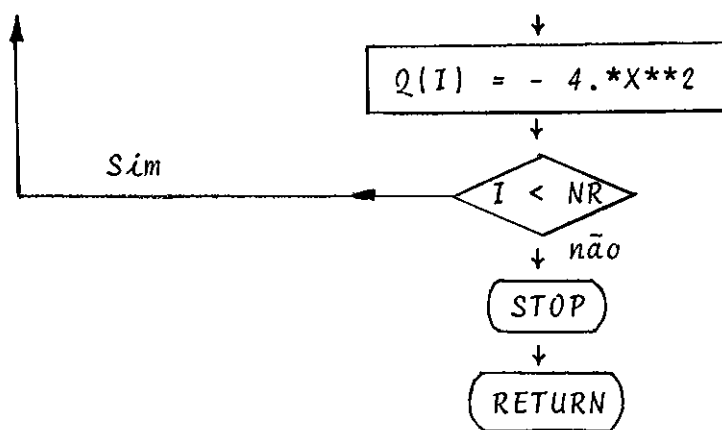
O diagrama de blocos e a listagem da subrotina COEF para este caso, encerram a marcha desenvolvida.

Observação: Embora, não se pretenda fazer uso desta nova subrotina, devem ser esclarecidos alguns pontos de vista visando sua futura utilização.

DIAGRAMA DE BLOCOS - SUBROTINA COEF
ADENSAMENTO EM UM PONTO







PAGE 1 A 63

// JOB T 00FF 10FF

A 63

543512

NUCLEO DE COMPUTACAO ELETRONICA DA UFRJ-1971

000	00FF	00FF	0000
0001	10FF	10FF	0001
		20FF	0002

V2 M09 ACTUAL 32K CONFIG 32K

// FOR DELISLE LOPES DA SILVA

*LIST SOURCE PROGRAM

*EXTENDED PRECISION

*ONE WORD INTEGERS

SUBROUTINE COEF

C*****

C ESTA SUBROTINA CALCULA OS COEFICIENTES DA SERIE CONVERGENTE

C CASO DE ADENSAMENTO EM UM PONTO

C*****

REAL N(10),N1(10)

COMMON EPSLO,NR,NN,KK,N,RAI7(100),A(100),P(100),Q(100)

READ(8,17)(N1(J),J=1,NN)

17 FORMAT(15F5.1)

I=0

2 I=I+1

CALL EBESJ(A(I),1,BJ,1.0E-6,IER)

CALL EBESY(A(I),0,BY,IER)

P1=BJ*BY

CALL EBESY(A(I),1,BY,IER)

CALL EBESJ(A(I),0,BJ,1.0E-6,IER)

P2=BY*BJ

DIF1=P1-P2

X1=A(I)*N1(KK)

CALL EBESJ(X1,0,BJ,1.0E-6,IER)

CALL EBESY(A(I),0,BY,IER)

P3=BJ*BY

CALL EBESY(X1,0,BY,IER)

CALL EBESJ(A(I),0,BJ,1.0E-6,IER)

P4=BY*BJ

DIF2=P3-P4

TERM1=-2.*DIF1*DIF2

X=A(I)*N(KK)

CALL EBESJ(X,0,BJ,1.0E-6,IER)

CALL EBESY(A(I),0,BY,IER)

P5=BJ*BY

CALL EBESY(X,0,BY,IER)

CALL EBESJ(A(I),0,BJ,1.0E-6,IER)

P6=BY*BJ

DIF3=P5-P6

TERM2=(N(KK)*DIF3)**2

TERM3=A(I)*(TERM2-DIF1**2)

P(I)=TERM1/TERM3

Q(I)=-4.*X**2

IF(I-NR)2,3,3

3 WRITE(5,4)N1(KK)

4 FORMAT(///15X,'VALORES DOS COEFICIENTES DA SERIE CONVERGENTE - REL
IACAO RADIAL N1 =' ,F5.1/15X,72(' ' ')/17X,'K COEF.P(K)

2 COEF.Q(K)')

DO 5 K=1,I

WRITE(5,6)K,P(K),Q(K)

PAGE 2 A 63

6 FORMAT(3X,I15,2F20.7)
5 CONTINUE
RETURN
END

FEATURES SUPPORTED
ONE WORD INTEGERS
EXTENDED PRECISION

CORE REQUIREMENTS FOR COEF

COMMON 1236 VARIABLES 88 PROGRAM 486

RELATIVE ENTRY POINT ADDRESS IS 00B5 (HEX)

END OF COMPILATION

// DUP

*STORE WS UA COEF
CART ID OUFF DB ADDR 4763 DB CNT 0022

Tratando-se de adensamento em um ponto, deverão ser pesquisados certo número de pontos no interior da zona de influência estabelecida para o dreno, isto é, para um dado valor da relação de diâmetros n . A solução para o caso será entrar com os valores de n todos iguais, somente variando os valores de $n1$. Da seguinte maneira:

Número de cartões	Dados dos cartões na ordem que devem ser fornecidos	FORMAT
1	EPSLO, NN, NR, NTH, NUR, KP, KD	F15.9, 5I5
1	(N(J), J=1, NN) sendo $N1=N2=N3=\dots NN$	15F5.1
1	(N1(J), J = 1, NN)	15F5.1

Para o caso de deformações iguais, o adensamento em um ponto é avaliado através da fórmula:

$$\frac{u_n}{u_0} = \frac{4e^\lambda}{D^2 F(n)} \left[\frac{D^2}{4} \ln \left(\frac{n}{n_w} \right) - \frac{n^2 - n_w^2}{2} \right]$$

$$\lambda = - \frac{\delta T_h}{F(n)}$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

que requer o conhecimento das variáveis \mathcal{D} (diâmetro zona influência), r_w (raio do dreno) e r (distância radial ao ponto considerado).

É uma solução muito simples, cuja computação pode ser executada facilmente baseada no que foi feito para o caso do adensamento médio.

CAPÍTULO III

ESTUDO EXPERIMENTAL

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo destina-se a apresentar os resultados obtidos para o coeficiente de permeabilidade horizontal de uma argila, através de um ensaio de adensamento com fluxo radial em direção a um dreno de areia executado no eixo da amostra. É colocado em prática o uso das curvas Teóricas de Porcentagem de Adensamento "versus" Fator Tempo obtidas através da computação automática apresentada no capítulo II. O ensaio realizado em laboratório corresponde à condição do caso de deformações verticais iguais; são apresentados os resultados para este caso, bem como são apreciados os resultados obtidos com o uso da curva teórica de adensamento radial para o caso de deformações livres. Para a realização dos ensaios seguimos, em linhas gerais, a técnica utilizada por SILVEIRA¹⁰ e MEDINA⁶.

2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

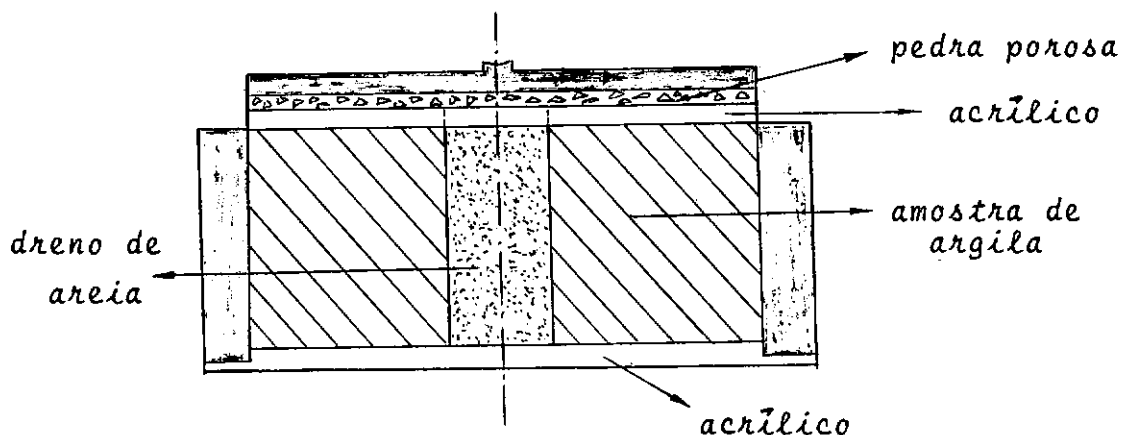
Foram realizados três ensaios de adensamento: um com drenagem segundo a direção vertical e, outros, dois, com

drenagem radial para drenos de diâmetros iguais a 1,55cm e 2,54cm; sendo aproximadamente 10,6cm o diâmetro do anel flutuante, as relações de diâmetros correspondentes serão 6,8 e 4,2. As curvas teóricas de adensamento radial (casos de deformações livres e deformações iguais), encontram-se apresentadas em apêndice no capítulo II e, também, fazem parte do conjunto de curvas mostradas no gráfico nº 1.

Colocada a amostra no anel de adensamento, o dreno foi executado pela penetração ao longo do eixo da amostra, de um tubo metálico com os bordos em bixel. Foram usados tubos de diâmetro externo iguais a 1,55cm (1º ensaio) e 2,54cm (2º ensaio). O orifício resultante da retirada da argila foi preenchido com uma mistura de areia e mica, em estado de saturação.

A proporção de mica adicionada à areia a fim de aumentar sua compressibilidade foi cerca de 15% em peso.

A eliminação da drenagem através das faces da amostra foi assegurada pelo uso de duas placas circulares em acrílico: uma adaptada ao bordo do anel, vedando a face inferior da amostra, e outra colocada sôbre a amostra, tendo ao centro um orifício de diâmetro igual ao do dreno executado.



O dreno central sômente passa a ser comprimido a pōs haver sido registrado um recalque da amostra de argila igual ao valor da espessura da placa de acrílico superior, evitando-se, dêsse modo, uma compressão do dreno pelo menos durante a fase inicial do ensaio.

As amostras ensaiadas eram de um material argiloso de origem orgânica, com algumas raízes e conchas, apresentando as seguintes características:

$$h = 140\%$$

$$LL = 158\%$$

$$\delta_g = 2,27$$

$$LP = 56\%$$

$$S = 100\%$$

$$LC = 28.5\%$$

$$e_0 = 3,18$$

$$IP = 102\%$$

3. RESULTADOS

Para cada carregamento foram feitas as curvas tempo-recalques dos ensaios. Para o cálculo da permeabilidade foi feito o ajuste da curva experimental com a teórica pelo método de Casagrande, determinando-se os tempos correspondentes a $u\% = 10, 20, 30 \dots 90$. O resultado do ajuste feito pode ser examinado através da relação Fator Tempo \div Tempo de Consolidação (T_h/t), que deveria ser constante se a curva experimental acompanhasse exatamente a curva teórica. Os resultados obtidos através dos ensaios com drenagem vertical e radial encontram-se nas Tabelas de números 1 a 3. Foram desenhadas (gráfico nº 2) as curvas pressões-coeficiente de permeabilidade (horizontal e vertical), com os valores do coeficiente de permeabilidade horizontal em escala logarítmica; o aspecto de tais curvas são de ramos de parábola.

De cada uma das curvas tempo-recalque extraiu-se o

Índice de vazios correspondente a 1440 minutos e com a respectiva pressão foram traçadas as curvas pressão-índice de vazios dos ensaios realizados (gráfico nº 3), bem como as curvas logarítmo da pressão "versus" índice de vazios e permeabilidade (gráfico nº 4).

OBS: O coeficiente de permeabilidade radial adotado para este gráfico foi a média dos valores encontrados para os casos de deformações iguais e deformações livres com o dreno de 2,54cm.

Os valores do Índice de compressão encontrados através de cada ensaio foram:

$$C_c = 1.02 \quad (\text{drenagem vertical})$$

$$C_c = 1.07 \quad (\text{drenagem radial com } n = 6.8)$$

$$C_c = 1.18 \quad (\text{drenagem radial com } n = 4.2).$$

Consolidação por Drenagem Vertical (TABELA 1)

U%	T_v	P=0.678		P=1.356		P=2.713		P=5.427		P=10.854		P=21.708	
		t	T_v/t	t	T_v/t	t	T_v/t	t	T_v/t	t	T_v/t	t	T_v/t
10	0.008	0.50	0.0160	0.65	0.0123	0.60	0.0133	0.70	0.0114	0.65	0.0123	0.45	0.0178
20	0.031	1.60	0.0193	1.80	0.0172	2.50	0.0124	2.20	0.0140	1.90	0.0163	1.60	0.0193
30	0.071	3.20	0.0221	3.40	0.0208	5.00	0.0142	3.80	0.0186	3.50	0.0202	3.20	0.0221
40	0.126	5.00	0.0252	5.80	0.0217	8.20	0.0153	6.00	0.0210	5.40	0.0233	5.00	0.0253
50	0.197	7.00	0.0281	9.00	0.0218	13.00	0.0151	9.50	0.0207	8.60	0.0229	8.00	0.0246
60	0.287	10.00	0.0287	14.00	0.0205	19.00	0.0151	13.00	0.0220	13.00	0.0220	11.00	0.0261
70	0.405	15.00	0.0270	22.00	0.0184	29.00	0.0139	24.00	0.0168	18.00	0.0225	17.00	0.0247
80	0.565	23.00	0.0245	34.00	0.0166	44.00	0.0128	43.00	0.0131	33.00	0.0171	25.00	0.0225
90	0.848	35.00	0.0242	56.00	0.0151	70.00	0.0121	70.00	0.0121	54.00	0.0156	40.00	0.0212
$e_{0\%}$		3.13		2.80		2.48		2.20		1.87		1.57	
$e_{100\%}$		2.87		2.56		2.25		1.92		1.61		1.31	
e_m		3.00		2.68		2.36		2.06		1.77		1.44	
$a_v = \Delta e / \Delta P$		0.380		0.350		0.170		0.100		0.038		0.024	
$(T_v/t)_m$		0.0239		0.0182		0.0138		0.0166		0.0192		0.0225	
$H_m/2$		1.67		1.53		1.41		1.28		1.15		1.02	
$10^{-7} K_v$		63.3		40.4		14.0		8.9		3.5		2.30	

$$K_v = \frac{T_v}{t} \gamma_0 \left(\frac{H_m}{2} \right)^2 \frac{a_v}{1+e_m}$$

$$\gamma_0 = 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}$$

OBS:

Tempo (t) em minutos

Coefficiente de permeabilidade (K_h ou K_v) em cm/min

Pressão (P) em Kg/cm²

Altura (H) em cm.

(as mesmas observações são válidas para as demais Tabelas).

Consolidação por drenagem radial, $n = 4.2$ (TABELA 2)

a) Caso de deformações iguais (TABELA 2-a)

$u\%$	T_h	$P=0.678$		$P=1.356$		$P=2.713$		$P=5.427$		$P=10.854$		$P=21.708$	
		t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t
10	0.011	0.90	0.0122	0.90	0.0122	1.20	0.0091	0.80	0.0130	0.54	0.0203	0.40	0.0275
20	0.022	1.80	0.0122	2.00	0.0110	3.00	0.0073	2.00	0.0110	1.50	0.0146	1.40	0.0157
30	0.035	3.00	0.0116	4.00	0.0087	6.00	0.0058	4.00	0.0087	2.70	0.0129	2.40	0.0146
40	0.050	5.00	0.0100	6.00	0.0083	9.30	0.0053	6.00	0.0083	4.20	0.0119	4.50	0.0111
50	0.069	8.00	0.0086	9.00	0.0076	14.00	0.0049	8.00	0.0086	6.00	0.0115	7.00	0.0099
60	0.090	11.50	0.0078	13.00	0.0069	20.00	0.0045	11.00	0.0081	8.20	0.0109	10.00	0.0090
70	0.130	17.50	0.0074	18.00	0.0072	29.00	0.0045	15.00	0.0086	11.50	0.0118	15.00	0.0087
80	0.170	25.00	0.0068	26.00	0.0065	44.00	0.0038	26.00	0.0065	17.00	0.0100	20.00	0.0085
90	0.220	35.00	0.0062	37.00	0.0059	60.00	0.0036	40.00	0.0055	38.00	0.0057	40.00	0.0055
	$e_{0\%}$	3.14		2.60		2.24		1.87		1.53		1.17	
e	$e_{100\%}$	2.66		2.29		1.91		1.59		1.26		0.87	
	e_m	2.90		2.44		2.07		1.72		1.39		1.02	
$a_v = \Delta e / \Delta P$		0.709		0.458		0.244		0.103		0.050		0.028	
$(T_h/t)_m$		0.0092		0.0082		0.0054		0.0078		0.0122		0.0127	
$10^{-6} K_h$		188		123		49		33		28		19	

$$K_h = \frac{T_h}{t} \gamma_0 D^2 \frac{a_v}{1+e_m}$$

$$\gamma_0 = 10^{-3} \frac{Kg}{cm^3}$$

$$D^2 = 10.6^2$$

b) Caso de deformações livres (TABELA 2-b)

$u\%$	T_h	$P=0.678$		$P=1.356$		$P=2.713$		$P=5.427$		$P=10.854$		$P=21.708$	
		t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t
10	0.005	0.90	0.0055	0.90	0.0055	1.20	0.0041	0.80	0.0062	0.54	0.0092	0.40	0.0125
20	0.016	1.80	0.0088	2.00	0.0080	3.00	0.0053	2.00	0.0080	1.50	0.0106	1.40	0.0114
30	0.030	3.00	0.0100	4.00	0.0075	6.00	0.0050	4.00	0.0075	2.70	0.0111	2.40	0.0125
40	0.046	5.00	0.0092	6.00	0.0076	9.30	0.0049	6.00	0.0076	4.20	0.0109	4.50	0.0102
50	0.065	8.00	0.0081	9.00	0.0072	14.00	0.0046	8.00	0.0081	6.00	0.0108	7.00	0.0092
60	0.088	11.50	0.0076	13.00	0.0067	20.00	0.0044	11.00	0.0080	8.20	0.0107	10.00	0.0088
70	0.120	17.50	0.0068	18.00	0.0066	29.00	0.0041	15.00	0.0080	11.50	0.0104	15.00	0.0080
80	0.170	25.00	0.0068	26.00	0.0065	44.00	0.0038	26.00	0.0065	17.00	0.0100	20.00	0.0085
90	0.220	35.00	0.0062	37.00	0.0059	60.00	0.0036	40.00	0.0055	38.00	0.0057	40.00	0.0055
	$e_{0\%}$	3.14		2.60		2.24		1.86		1.53		1.17	
e	$e_{100\%}$	2.66		2.29		1.91		1.59		1.26		0.87	
	e_m	2.90		2.44		2.07		1.72		1.39		1.02	
$a_v = \Delta e / \Delta P$		0.709		0.458		0.244		0.103		0.050		0.028	
$(T_h/t)_m$		0.0076		0.0068		0.0044		0.0072		0.0087		0.0096	
$10^{-6} K_h$		155		102		38		29		20		16	

Consolidação por drenagem radial, $n = 6.8$ (TABELA 3)

a) Caso de deformações iguais (TABELA 3-a)

$U\%$	T_h	$P=0.678$		$P=1.356$		$P=2.713$		$P=5.427$		$P=10.854$		$P=21.708$	
		t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t
10	0.016	0.90	0.0177	1.00	0.0160	0.80	0.0200	0.80	0.0020	0.56	0.0286	0.60	0.0266
20	0.033	2.10	0.0157	2.00	0.0165	2.50	0.0132	1.90	0.0173	1.20	0.0275	1.50	0.0220
30	0.053	3.60	0.0147	3.30	0.0160	4.00	0.0132	3.50	0.0151	2.20	0.0241	2.60	0.0204
40	0.078	6.00	0.0130	5.10	0.0152	7.10	0.0109	5.80	0.0134	3.40	0.0229	3.80	0.0205
50	0.110	9.00	0.0122	8.00	0.0137	11.00	0.0100	7.80	0.0141	5.10	0.0215	5.00	0.0220
60	0.150	12.00	0.0125	13.00	0.0115	15.00	0.0100	12.00	0.0125	7.00	0.0214	6.40	0.0242
70	0.180	18.00	0.0100	23.00	0.0078	25.00	0.0072	17.00	0.0105	10.00	0.0180	8.20	0.0220
80	0.250	28.00	0.0089	42.00	0.0059	40.00	0.0062	26.00	0.0096	14.00	0.0178	11.00	0.0227
90	0.350	45.00	0.0077	85.00	0.0041	72.00	0.0048	48.00	0.0072	23.00	0.0152	17.00	0.0206
	$e_{0\%}$	3.12		2.71		2.35		2.01		1.73		1.41	
	$e_{100\%}$	2.75		2.41		2.10		1.76		1.53		1.17	
	e_m	2.97		2.56		2.22		1.88		1.63		1.29	
$\alpha_v = \Delta e / \Delta P$		0.546		0.444		0.184		0.092		0.037		0.022	
$(T_h/t)_m$		0.0125		0.0118		0.0106		0.0133		0.0218		0.0223	
$10^{-6} K_h$		193		165		68		47		34		24	

b) Caso de deformações livres (TABELA 3-b)

U%	T_h	P=0.678		P=1.356		P=2.713		P=5.427		P=10.854		P=21.708	
		t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t	t	T_h/t
10	0.010	0.90	0.0111	1.00	0.0100	0.80	0.0125	0.80	0.0125	0.56	0.0178	0.60	0.0166
20	0.027	2.10	0.0128	2.00	0.0135	2.50	0.0108	1.90	0.0142	1.20	0.0225	1.50	0.0180
30	0.048	3.60	0.0133	3.30	0.0145	4.00	0.0120	3.50	0.0137	2.20	0.0218	2.60	0.0184
40	0.073	6.00	0.0121	5.10	0.0143	7.10	0.0102	5.80	0.0125	3.40	0.0214	3.80	0.0192
50	0.100	9.00	0.0111	8.00	0.0125	11.00	0.0090	7.80	0.0128	5.10	0.0196	5.00	0.0200
60	0.140	12.00	0.0116	13.00	0.0107	15.00	0.0093	12.00	0.0116	7.00	0.0200	6.20	0.0225
70	0.180	18.00	0.0100	23.00	0.0078	25.00	0.0072	17.00	0.0105	10.00	0.0180	8.20	0.0219
80	0.250	28.00	0.0089	42.00	0.0059	40.00	0.0062	26.00	0.0096	14.00	0.0178	11.00	0.0227
90	0.350	45.00	0.0077	85.00	0.0041	72.00	0.0048	48.00	0.0072	23.00	0.0152	17.00	0.0205
	$e_0\%$	3.12		2.71		2.35		2.01		1.73		1.41	
	$e_{100\%}$	2.83		2.41		2.10		1.76		1.53		1.17	
	e_m	2.97		2.56		2.22		1.88		1.63		1.29	
$a_v = \Delta e / \Delta P$		0.546		0.444		0.184		0.092		0.037		0.022	
$(T_h/t)_m$		0.0109		0.0103		0.0091		0.0116		0.0193		0.0199	
$10^{-6} K_h$		168		144		60		41		30		21	

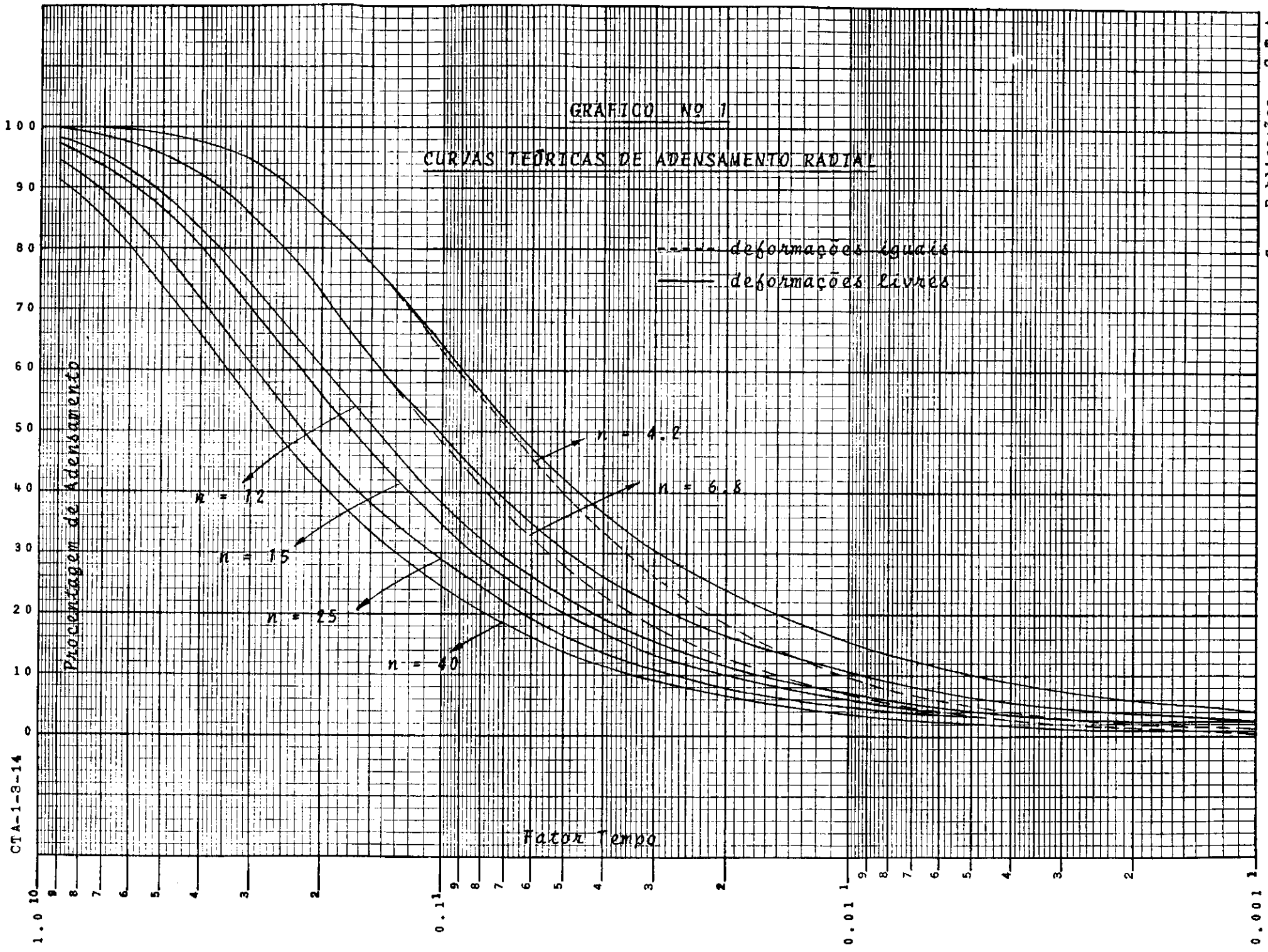


GRÁFICO Nº 2

CURVAS PRESSÃO - PERMEABILIDADE

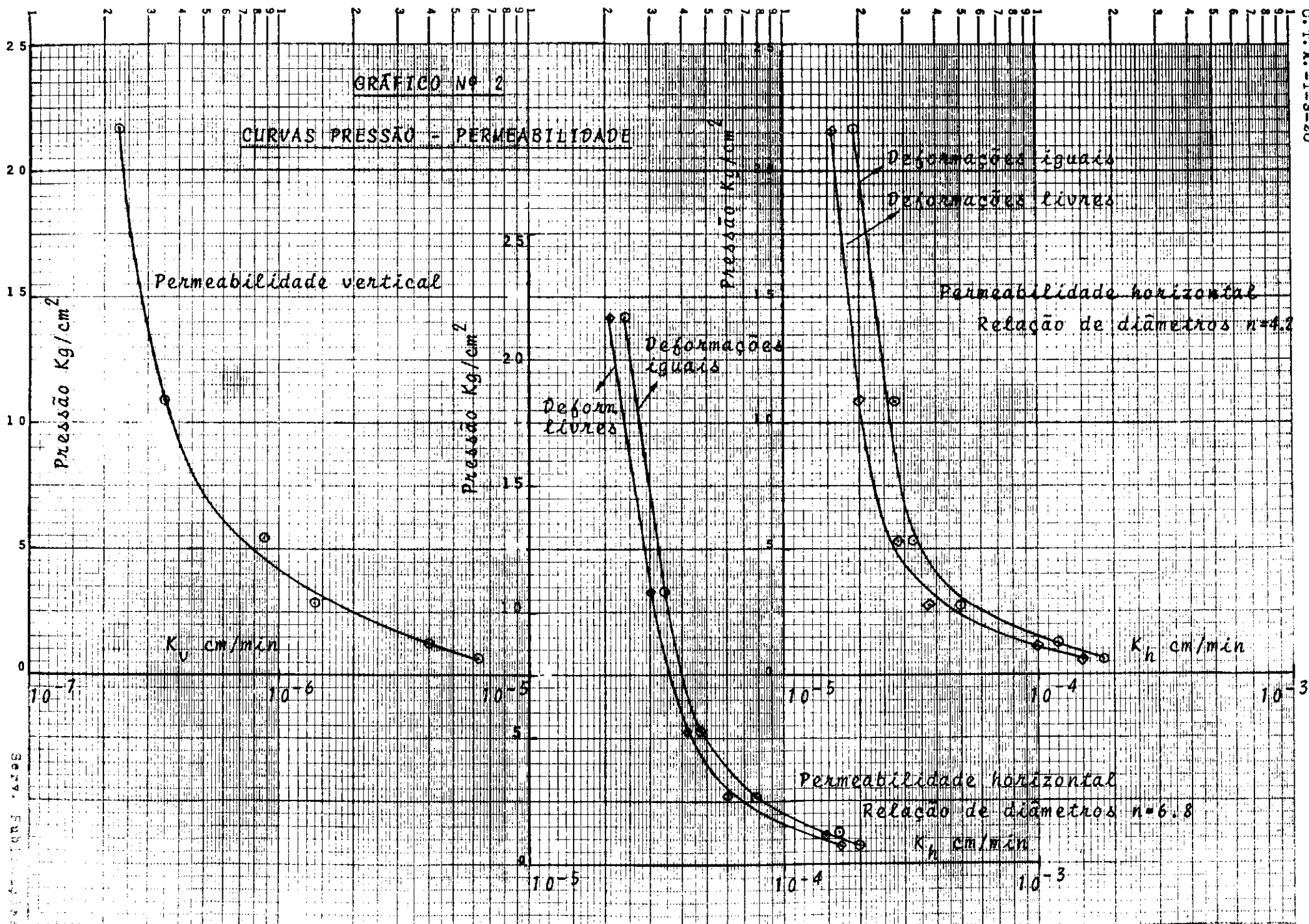


GRÁFICO Nº 3

CURVAS PRESSÃO - ÍNDICE DE VAZIOS

○ - adensamento vertical

▽ - adensamento radial $n = 0.5$

△ - adensamento radial $n = 2.0$

Índice de vazios

Pressão Kg/cm^2

Pressão Kg/cm²

10.0

20.0

0.1

1.0

2

3

4

5

6

7

8

9

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

GRÁFICO Nº 4

PRESSÃO - ÍNDICE DE VAZIOS - PERMEABILIDADE

Permeabilidade radial

○-adensamento vertical

△-adensamento radial n=4.2

▽-adensamento radial n=6.8

Índice de vazios

(P, e, K)

Permeabilidade vertical

K_v cm/mín

K_h cm/mín

10⁻⁷

10⁻⁶

10⁻⁵

10⁻⁴

10⁻³

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

1 - Os valores do coeficiente de permeabilidade calculados para o caso de deformações verticais iguais, foram superiores aos obtidos considerando o caso de deformações livres, o que já era esperado, tendo-se em vista que a expressão de Barron para o caso de deformações iguais conduz a valores mais elevados do Fator Tempo correspondente a uma mesma porcentagem de adensamento, aumentando dêsse modo o valor do elemento de comparação (T_h/t). O ensaio de laboratório não reproduz a condição de deformações livres, contudo, o uso da curva teórica para êste caso não conduz a êrros graves, a não ser que a relação de diâmetros seja muito pequena, quando a discrepância deverá ser acentuada.

2 - Seccionando as amostras apôs a consolidação, verificou-se que a deformação do dreno central acompanhara a do corpo de prova argiloso, não sendo observada qualquer deformação lateral do dreno, cuja área permaneceu constante, não alterando, portanto, a relação de diâmetros durante o ensaio. Um dos pontos discutíveis do ensaio, e apontado como fator de êrro, é que o esforço de compressão sôbre a amostra é absorvido em parte pelo dreno e, portanto, a pres

são que atua realmente sobre a argila é inferior à conside
rada.

3 - Observou-se também, que o coeficiente de permeabi
lidade calculado através do ensaio com o dreno de diâme
tro igual a 1,55cm apresenta valor um pouco superior ao calcul
ado com o dreno de 2,54cm de diâmetro. Teoricamente os
resultados deveriam ser iguais em ambos os casos, não o sen
do, provavelmente devido a que o esforço absorvido pelo dreno
deve diminuir com sua área, aumentando, consequentemente,
a pressão sobre a argila.

4 - A relação entre o coeficiente de permeabilidade
horizontal e o vertical apresentou-se crescente com o aument
o de pressão, sem no entanto obedecer a qualquer lei de varia
ção.

5 - O coeficiente de compressibilidade obtido no caso
do fluxo radial, inicialmente manteve-se bastante superior
ao do caso do fluxo vertical, tendendo a uma aproximação
com a aplicação dos últimos carregamentos. Este fato é expli
cável tendo-se em vista que o aceleração da consolidação
implica numa maior redução inicial dos vazios.

5. ILUSTRAÇÃO FOTOGRÁFICA

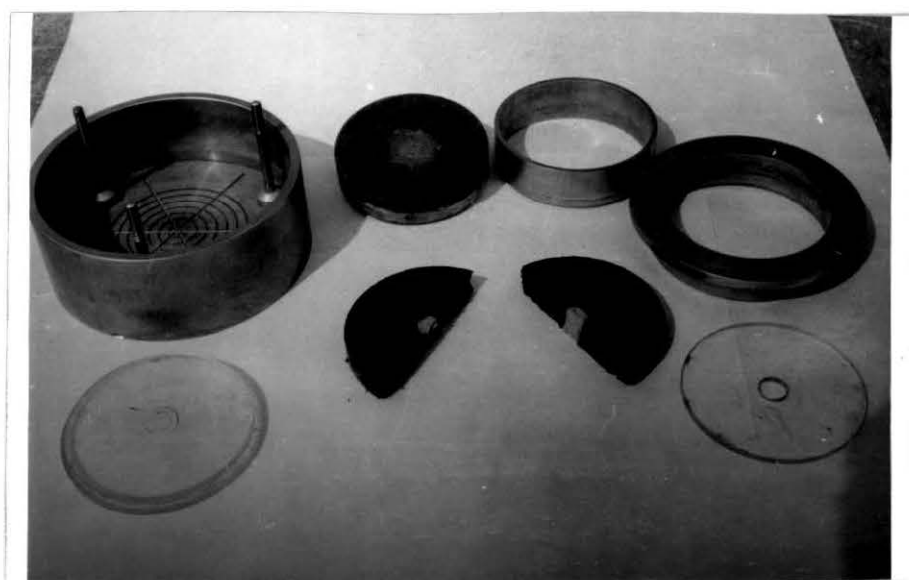


FOTO 1

Vista do equipamento utilizado: célula, anel flutuante, pedra porosa e placas de acrílico.



FOTO 2

Vista dos corpos de prova seccionados após a consoli
dação. Drenos de 2,54cm e 1,55cm respectivamente.



FOTO 3

Vista Frontal dos corpos de prova seccionados.

BIBLIOGRAFIA

1. BARRON, R.A. - "Consolidation of fine-grained soils by drain wells". Trans. ASCE, vol. 113, 1948.
2. BARROS, J.S. - "Ensaio de Adensamento de Argilas com drenagem radial externa". Revista do Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Fevereiro de 1951.
3. CARRILO, N. - "Simple, Two and Three dimensional cases in the Theory of consolidation of soils". J. of Math. and Phys., 1942.
4. GIBSON, R.E. & Lumb, P. - "Numerical Solutions of some problems in the Consolidation of Clay". Proc. ICE, 1953.
5. LEONARDS, G.A. - "Foundation Engineering". McGraw-Hill Book Co., 1962.
6. MEDINA, Jacques de - "Determinação do Coeficiente de permeabilidade horizontal de uma argila por meio de um ensaio de Adensamento Radial". Rev. do Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Outubro de 1950.

7. ORTENBLAD, Alberto - "Teoria sôbre pressões internas e processos de consolidação de depósitos sedimentares". Rio de Janeiro, 1956.
8. PACITTI, T. - "Fortran Monitor, Princípios". Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1967.
9. RICHART, F.E. Jr. - "Review of the Theories for sand drains". Trans. ASCE, 1957.
10. SILVEIRA, Icarahy da - "Consolidação de Argila mediante drenagem radial". Rev. do Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Maio de 1950.
11. SILVEIRA, Icarahy da - "Teoria e Utilidade do Ensaio de Consolidação de Argilas com Drenagem Radial Externa". Rev. do Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Dezembro de 1950.
12. MARTINS, J.B. - "Application of Numerical and Electronic Computer Methods to a Radial Water Diffusion Problem with Mixed Boundary Conditions". Universidade de Lourenço Marques, 1969.

BIBLIOGRAFIAS AUXILIARES

- CAPUTO, H.P. - "Mecânica dos solos e suas aplicações". Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1967.
- LAMBE, T.W. - "Soil Testing for Engineers". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1951.
- PACHECO Silva, F. - "Drenos Verticais de Areia na Variante Rio-Petropolis". Rev. do Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Outubro de 1950.
- SILVEIRA, Icarahy da - "Consolidation of a Cylindrical clay sample with External Radial Flow of Water". Proc. of 3rd Int. Conf. Soil Mech.
- TAYLOR, D.W. - "Fundamentals of Soil Mechanics in Engineering Practice". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948.
- TSCHEBOTARIOFF, G. - "Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures". McGraw-Hill Book, New York, 1951.
- VELLOSO, Dirceu de A. - "Obras de Terra sobre solo compressível". Rev. do Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Setembro de 1957.

VARGAS, Milton - "A Teoria dos Drenos Verticais de Areia".
(II Symposium de Mecânica dos Solos). Rev. do Clube de
Engenharia, Rio de Janeiro, Abril de 1949.

YOUNGER, J.S. - "Design Procedure for Sand Drains". Civil
Engineering and Public Work Review, March 1968.